

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Tiana Kiesslich Fraiji

INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA ENTRE LINHAS DE
TRANSMISSÃO E DUTOS, UTILIZANDO O ATP – UMA
ANÁLISE DA LT 525 KV CAMPOS NOVOS – BLUMENAU

Orientador: João Pedro Assumpção Bastos

Florianópolis, 2007

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores e funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio e incentivo.

À Empresa Lumi Consultoria e Engenharia Ltda e seus funcionários por colocar à disposição as informações técnicas que ilustram este trabalho.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	5
1.1.OBJETIVOS	6
1.2.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
2. REVISÃO	9
2.1.AS EQUAÇÕES DE MAXWELL	9
2.1.1 Lei de Ampère-Maxwell.....	12
2.1.2 Lei de Faraday-Lenz	13
2.1.3 Lei de Gauss	14
2.1.4 Conservação de fluxo magnético	14
2.2.RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E CARACTERÍSTICA DO MEIO.....	15
2.3.AS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	15
2.3.1 Evolução Histórica.....	17
2.3.2 Equações de Modelo e Leis de Maxwell	22
2.3.3 Linhas de Transmissão sem Perdas	23
2.3.4 Linhas de Transmissão com Perdas.....	28
2.3.5 Características Físicas.....	34
2.4.CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	37
2.5.DUTOS.....	38
2.5.1. Histórico e Perfectivas Futuras do Gás Natural.....	38
2.5.2. Gasoduto Brasil-Bolívia.....	43
2.6.INTERFERÊNCIA ‘	44
3. METODOLOGIA.....	49

3.1.UM BREVE HISTÓRICO DO ATP	49
3.2.INFORMAÇÕES GERAIS	51
3.3.PADRONIZAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO ATP	53
4. RESULTADOS.....	64
5. CONCLUSÃO	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

Interferências eletromagnéticas, causadas por linha de transmissão e distribuição de energia em vizinhanças metálicas, como dutos de gás e óleo, têm se tornado fonte de preocupação desde o início dos anos 60 [1], quando se observou um aumento significativo da carga e dos níveis de curto-circuito para satisfazer a demanda de energia exigida pelo aumento do consumo.

Acoplamentos eletromagnéticos podem induzir tensões em circuitos localizados nas proximidades da linha durante o funcionamento normal, ou em situações de curto-circuito na linha. Os níveis destas tensões induzidas podem tanto danificar equipamentos conectados a estes circuitos e aos seus isolamentos, como comprometer a segurança de pessoas que venham a ter contato com eles.

Perturbações eletromagnéticas são acopladas em circuitos eletrônicos através de dois mecanismos básicos: acoplamento condutivo, resultante dos campos elétricos associados à linha e acoplamento indutivo, resultante dos campos magnéticos.

As tensões induzidas por acoplamento indutivo ocorrem durante a operação normal da linha, ou em situação de curto-circuito, e são decorrentes dos campos magnéticos criados pelas correntes de fase e de curto-circuito que circulam nos condutores e pára-raios da linha. Estes campos magnéticos induzem campo elétrico, que se manifesta, em meios condutores, pela circulação de uma

corrente elétrica, elevando a diferença de potencial no duto. As tensões resultantes do acoplamento condutivo, embora também ocorram durante a operação normal da linha ou em situação de falta, apresentam valor relevante apenas quando correntes passam a escoar para a terra através das resistências de aterramento das torres, devido ao curto-circuito [30]. A diferença de potencial entre o duto e a terra que o cerca representa a parcela de interferência condutiva.

O cálculo de tensões e correntes induzidas em dutos nas proximidades de linhas de transmissão não é uma tarefa simples, uma vez que devem ser considerados os acoplamentos existentes entre os diversos circuitos envolvidos no cálculo. Além disso, os acoplamentos eletromagnéticos entre a linha e duto variam com a distância e com o ângulo de cruzamento entre a linha e duto e são dependentes da resistividade do solo (muito importante no cálculo do acoplamento condutivo) [2].

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é utilizar a ferramenta computacional descrita em [3], já amplamente utilizada para cálculos eletromagnéticos, para calcular os efeitos da interferência eletromagnética, na ocasião de paralelismo e cruzamento de linhas de transmissão com dutos, de forma rápida e precisa. Para isso, será necessário conhecer o programa computacional a ser utilizado e estabelecer uma padronização

para modelar a linha de transmissão e o duto, respeitando o acoplamento indutivo e condutivo entre eles.

A metodologia apresentada a seguir, permite calcular as tensões e correntes induzidas nos dutos de forma eficiente e prática, ilustrando a distribuição de corrente e tensão nos condutores da linha e em elementos multiterrados, como cabos pára-raios, resistências de aterramentos e dutos representados por circuitos PI's conectados em série.

Este trabalho é ilustrado através da linha de transmissão em 525kV Campos Novos - Blumenau, que pertence às obras de ampliação do suprimento de energia do estado de Santa Catarina. A operação do gasoduto que cruza com a referida linha, é de responsabilidade da Transportadora Brasileira Gasoduto Brasil-Bolívia S.A. (TBG).

1.2. Organização da dissertação

Quanto à estrutura, este trabalho foi dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos temas importantes para a compreensão dos fenômenos eletromagnéticos envolvendo linhas de transmissão e dutos. São abordadas, nesse capítulo, as grandezas eletromagnéticas por trás da interferência, a conjuntura das linhas de transmissão e dos dutos em operação no Brasil e suas perspectivas futuras, a avaliação de um modelo matemático adequado para representação da linha, que identifique as variáveis que interferem nos campos

eletromagnéticos presentes no sistema e que irão interagir com o duto e uma discussão sobre o fenômeno da interferência eletromagnética. As diretrizes metodológicas que orientaram as simulações no ATP encontram-se no Capítulo 3. Os resultados das simulações e discussões sobre os resultados são apresentados no Capítulo 4. Finalmente as conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

2. REVISÃO

A base teórica do eletromagnetismo é o conjunto das quatro equações de Maxwell que, complementadas pelas leis constitutivas, descrevem como os campos elétrico e magnético se relacionam e como variam em função do tempo e da posição no espaço.

As quatro equações de Maxwell expressam como cargas elétricas produzem campos elétricos (Lei de Gauss), a ausência experimental de monopólos magnéticos, como corrente elétrica produz campo magnético (Lei de Ampère-Maxwell), e como variações de campo magnético produzem campos elétricos (Lei da indução de Faraday-Lenz). Maxwell, em 1864, foi o primeiro a colocar todas as quatro equações juntas e perceber que era necessária uma correção na lei de Ampère: alterações no campo elétrico atuam como correntes elétricas, produzindo campos magnéticos [4].

Este capítulo inicial irá explicar as grandezas físicas eletromagnéticas relativas a essas equações, analisa-las isoladamente e discutir as leis constitutivas.

2.1. As equações de Maxwell

As grandezas básicas do eletromagnetismo são o Campo Elétrico \mathbf{E} , o Campo Magnético \mathbf{H} , a Indução Magnética \mathbf{B} , a indução Elétrica \mathbf{D} , a Densidade Superficial de Corrente \mathbf{J} e a densidade

volumétrica de carga ρ . A notação utilizada neste trabalho utiliza caracteres em negrito para grandezas vetoriais.

O conceito de campo elétrico, representado por linhas de campo elétrico, foi desenvolvido por Michael Faraday no século XIX, que relacionou o número de linhas de campo ao redor de um corpo carregado, ao módulo de \mathbf{E} [5] [6]. Teoricamente, pode ser definido como força elétrica por unidade de carga. Sua direção é a mesma que esta força exerceria em uma carga de teste positiva. A unidade de campo elétrico é *Volt* por metro (V/m).

Enquanto o campo elétrico é originado a partir de uma carga estacionária carregada, o campo magnético \mathbf{H} é criado a partir de cargas elétricas em movimento. Um conjunto de cargas em movimento nos conduz à noção de corrente elétrica e esta cria o campo de vetores \mathbf{H} . A unidade de campo magnético é *Ampère* por metro (A/m).

A indução magnética \mathbf{B} , também chamada de densidade de fluxo magnético, se relaciona com o campo magnético \mathbf{H} através da permeabilidade do meio μ . A relação entre estas grandezas é dada por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.1.1)$$

Uma vez que a permeabilidade do meio expressa intrinsecamente sua capacidade de se mostrar mais ou menos susceptível à passagem do fluxo, a indução magnética \mathbf{B} reflete a capacidade de induzir fluxo magnético em um determinado meio [7]. Sua unidade é o *T(Tesla)*. A permeabilidade relativa do ar é $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ *Henry/metro*.

A indução elétrica \mathbf{D} , assim como a magnética \mathbf{B} , também está associada às características do material:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.1.2)$$

Onde ε é a permissividade do material. No caso do ar, sua permissividade é $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Farad/metro}$. A indução elétrica é dada em *Coulomb/metro*.

Algumas vezes é necessário conhecer o fluxo de carga num ponto particular no interior de um condutor. A grandeza que descreve este fluxo é a densidade de corrente \mathbf{J} , uma grandeza vetorial que aponta na direção do campo elétrico \mathbf{E} , e é medida em *Ampère* por metro quadrado (A/m^2).

A capacidade de um meio de conduzir mais ou menos corrente está associada à sua condutividade elétrica σ , cuja unidade é *Siemens/metro*. A relação abaixo, expressa a relação de σ com a densidade de corrente em um meio qualquer:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.1.3)$$

As equações de Maxwell descrevem como campos magnéticos se estabelecem pontualmente e mostram que estas variações dependem de grandezas como \mathbf{J} , ρ , $\partial \mathbf{B} / \partial t$ e $\partial \mathbf{D} / \partial t$ presentes num dado ponto. São elas:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (\text{Lei de Ampère-Maxwell}) \quad (2.1.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday-Lenz}) \quad (2.1.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{Lei de Gauss}) \quad (2.1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Conservação de fluxo magnéticos}) \quad (2.1.7)$$

2.1.1 Lei de Ampère-Maxwell

Inspirado pela descoberta do físico dinamarquês Hans Christian Oersted, que em 1820 observou que a passagem de uma corrente elétrica por um fio gera um campo magnético, André Marie Ampère formulou a Lei que leva seu nome no início do século XIX. Oersted esclareceu o efeito de uma corrente de condução sobre um ímã e o efeito de um ímã sobre uma corrente [9]. Maxwell, mais tarde, observou que campos magnéticos eram gerados pela variação temporal de indução elétrica, mesmo na ausência de correntes, e completou a Lei de Ampère com o termo $\partial \mathbf{D} / \partial t$ da equação (2.1.4) (Lei de Ampère-Maxwell) que trata da corrente de deslocamento.

Esta lei expressa, portanto, a maneira com a qual um campo magnético pode ser criado a partir da variação temporal da indução elétrica \mathbf{D} e da corrente de condução, associada a \mathbf{J} . Sua representação na forma integral é:

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.1.8)$$

As correntes que circulam ao longo do condutor, em uma situação onde não há indução elétrica ou sem variação temporal, podem ser calculadas pela equação (2.1.9).

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (2.1.9)$$

2.1.2 Lei de Faraday-Lenz

Hans Christian Oersted já havia comprovado, em 1820 [9], que uma corrente elétrica poderia originar um campo magnético. Michael Faraday, em 1831 [6], demonstrou que o inverso é verdadeiro, ou seja, um campo magnético variável pode gerar um campo elétrico e, em meios condutores, esse campo se manifesta pela circulação de uma corrente elétrica [5]. Três anos depois de Faraday ter formulado a Lei de Indução de Faraday, Heinrich Friedrich Lenz determinou que o sentido de uma corrente induzida numa espira fechada, era oposto à variação que o produziu. O sinal negativo da equação (2.1.5), que expressa tal oposição, é necessário para manter a conservação de energia.

Integrando-se os dois lados desta equação em uma superfície S , aplicando o teorema de Stokes, essa equação de Maxwell é obtida na forma integral (2.1.10).

$$\int_S \text{rot} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \int_S -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.1.10)$$

Que pode ser reescrita ilustrando como uma variação de fluxo magnético cria uma força eletromotriz.

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1.11)$$

2.1.3 Lei de Gauss

Integrando a Lei de Gauss, obtém-se a forma integral da equação de Maxwell, que estabelece que o fluxo líquido \mathbf{D} através de uma superfície que envolve um volume é igual à carga contida neste volume. A forma integral desta equação é obtida através do Teorema da Divergência.

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho \cdot dv \quad (2.1.12)$$

2.1.4 Conservação de fluxo magnético

A equação (2.1.7) significa que o fluxo magnético é conservativo. Ou seja, todo o fluxo magnético que entra em um volume é igual ao que sai do volume.

A forma integral dessa equação, obtida através do teorema da divergência, exprime matematicamente que o somatório do fluxo \mathbf{B} de qualquer superfície fechada é nulo.

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (2.1.13)$$

Essa equação é conhecida como Lei de Gauss do Magnetismo.

2.2. Relações Constitutivas e Característica do Meio

O conjunto expressões que relaciona os vetores dos campos do eletromagnetismo com as características dos materiais, também chamado de relações constitutivas, já foi abordado anteriormente. Os parâmetros constitutivos são usados para caracterizar as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais.

Em geral, os materiais podem ser caracterizados como: dielétricos, magnéticos e condutores, dependendo, respectivamente, se o fenômeno predominante é polarização, magnetização ou condução [10].

Com relação às características constitutivas dos materiais, estes podem ser classificados como lineares se as características do meio não dependem da intensidade do campo eletromagnético aplicado. Caso contrário ele é dito não-linear. Ele é homogêneo se as características do meio não variam com a posição e não-homogêneo no caso contrário. Ele é isotrópico se as características do meio não dependem da polarização do campo e anisotrópico se é afirmativo. Finalmente, ele é não-dispersivo quando as características do meio não variam com a frequência de operação.

2.3. As Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão constituem o principal meio de transporte de energia elétrica [11].

JAC Stewart definiu uma linha de transmissão como “um sistema de dois condutores, normalmente de secções uniformes, usados para guiar energia eletromagnética entre dois lugares”. Em baixas frequências, a energia é associada à diferença de potencial entre os dois pontos do circuito (ou malha) e à corrente elétrica circulando nos condutores.

Uma vez que o presente trabalho trata da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos, devido à ocorrência de curto-circuito na linha, é importante conhecer a distribuição das linhas de transmissão em operação no Brasil, bem como as perspectivas futuras deste segmento. A distribuição dos dutos de gás, será vista no item 2.5. Além disso, a adoção do modelo matemático adequado para representação da linha é importante, não só para a precisão dos resultados simulados, mas para identificar as variáveis que interferem nos campos eletromagnéticos presentes no sistema, e que irão interagir com o duto.

O modelo matemático que representa os mais importantes componentes de um sistema de potência (linhas, cabos, transformadores) deve representar os campos eletromagnéticos e as perdas [12]. Campos eletromagnéticos são, em geral, representados utilizando aproximação de circuitos: Os efeitos dos campos magnéticos são representados por indutores ou pelo acoplamento entre eles, enquanto os efeitos do campo elétrico podem ser simulados por capacitores. Em modelos com maior precisão, como linhas de transmissão modeladas por parâmetros

distribuídos, os modelos matemático são baseados na solução de equações diferenciais.

Assim como os efeitos dos campos eletromagnéticos, as perdas são representadas utilizando aproximação de circuitos. As perdas, na maioria das vezes, não podem ser separadas dos campos magnéticos e podem ser representadas por resistores, ou uma combinação de vários tipos de elementos de circuitos.

Segundo A. Martinez [12], para representar os efeitos do campo eletromagnético e as perdas nas linhas de transmissão, os parâmetros podem ser deduzidos utilizando solução analítica baseada na geometria utilizada na linha e na separação do campo elétrico e magnético. Medições podem ser necessárias para obter algumas propriedades dos materiais, tais como resistividade, permeabilidade e permissividade. Entretanto, na maioria dos casos, os valores podem ser obtidos de catálogos de fabricantes. Se o comportamento do componente for linear, a permeabilidade pode ser aproximada à do vácuo. Se o comportamento do componente for não-linear (isto é, os materiais ferromagnéticos saturados), podem ser obtidos os ciclos de saturação ou curva de histerese.

2.3.1 Evolução Histórica

Historicamente, os primeiros sistemas comerciais de eletricidade, datam de 1882, quando Thomas Edison inaugurou a central

elétrica de Pearl, alimentando parte de Nova Iorque com corrente contínua. A energia era distribuída na tensão produzida.

Com a invenção do transformador, por volta de 1885, foi possível gerar energia numa tensão, transmitir em outra e ainda distribuir em outro nível, desde que fosse interligado em corrente alternada. A adoção de sistemas de transmissão em corrente alternada foi consolidada a partir da invenção do motor de indução, por volta de 1888, por Ferraris e Tesla [13].

As primeiras linhas de transmissão foram evoluindo no nível de tensão e na capacidade de transmissão à medida que a demanda de energia elétrica crescia e o desenvolvimento tecnológico de transporte de energia era aprimorado [14][15]. Os níveis de tensão passaram de 60 kV, por volta de 1903, para 735 kV, no ano de 1965.

No Brasil, a primeira linha de transmissão registrada, foi construída no estado de Minas Gerais, em 1883. Atualmente, a rede básica de transmissão compreende tensões da ordem de 230kV a 750kV.

O Sistema Interligado Nacional - SIN, desenvolveu-se no Brasil em função da grande variedade de níveis de tensão e das enormes distâncias entre as fontes geradoras e os centros de carga. Sua função, além da transmissão da energia das usinas geradoras aos centros de carga, é promover a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico brasileiro e a integração com os países vizinhos, assegurando, portanto, a estabilidade e confiabilidade do sistema. Está dividido em quatro regiões

geoelétricas interligadas Sul/ Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste [16].

A interligação Norte – Sul é formada por dois circuitos em 500kV desde a subestação Imperatriz até a Serra da Mesa. É prevista para 2008 a expansão desta interligação, correspondendo a um total da ordem de 2.600 km de linhas de transmissão em 500 kV. São ainda previstos reforços complementares na região Sudeste.

A interligação Norte-Nordeste existente é constituída pelas linhas de transmissão em 500 kV Presidente Dutra - Boa Esperança e Presidente Dutra – Teresina – Sobral – Fortaleza C1 e C2. Estudos demonstram a necessidade de uma expansão de 1.500 MW na capacidade desta interligação. A primeira expansão está prevista para maio de 2007.

A interligação Sudeste-Nordeste é constituída pela linha de transmissão em 500 kV Serra da Mesa – Rio das Éguas Jesus da Lapa – Ibicoara – Sapeaçu - Camaçari,

A interligação Sul-Sudeste contempla linhas de transmissão que variam de 88 kV a tensões de 500kV.

A interligação do subsistema dos estados do Acre e Rondônia, atualmente isolado, com o subsistema da região Sudeste/Centro-Oeste foi considerada a partir do ano de 2008 com a instalação de 947 km de linhas de transmissão.

A partir de 2012, prevê-se a interligação Tucuruí-Macapá-Manaus, possibilitando a integração ao SIN de sistemas da região amazônica, hoje isolados. Tais sistemas compreendem os de

atendimento a Manaus, ao Amapá e as cidades situadas na margem esquerda do rio Amazonas entre Manaus e o Amapá.

Além do projeto binacional de Itaipu, envolvendo Brasil e Paraguai, a configuração atual contempla interligações do Brasil com Argentina, Uruguai e Venezuela. A possibilidade de ampliação dessas interligações ou o estabelecimento de novos pontos de interligação tem sido objeto de análises específicas pelo Ministério de Minas e Energia – MME [17].

A região Sul, constituída pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, cumpre um importante papel na integração com os países do Mercosul, com destaque na importação/exportação de energia com a Argentina, Uruguai e Paraguai.

A região possui uma extensa malha de Rede Básica em 500 kV que constitui o sistema de conexão entre as usinas hidrelétricas das Bacias dos rios Iguaçu e Uruguai. Os grandes centros de carga são atendidos por subestações de 500/230 kV, a partir das quais se desenvolve a malha em 230 kV [18].

Este sistema, além do atendimento ao mercado regional, participa da otimização energética entre as regiões Sul e Sudeste através de conexões com os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

O esquema elétrico desta região está ilustrado na Figura 1 a seguir.



Figura 1. Distribuição das Linhas de Transmissão na Região Sul (FONTE ELETROSUL)

No estado de Santa Catarina, onde está localizada a linha de transmissão estudada neste trabalho, o atendimento elétrico é feito por instalações da Rede Básica nas tensões de 500 kV e 230 kV de propriedade da Eletrosul.

O estado conta com duas Subestações em 500/230 kV: A Subestação de Blumenau (3 x 672 MVA), suprida por duas linhas de 500 kV, provenientes de Campos Novos e Curitiba, e a Subestação Campos Novos (672 + 336 MVA), ponto de confluência das usinas do rio Uruguai.

O atendimento às quatro regiões geoeletricas do estado é feito da seguinte forma: A Região Leste, que concentra a maior parte do

consumo industrial do estado, correspondente a 60% da carga de energia elétrica de Santa Catarina, é atendida a partir da Subestação de Blumenau. A Região do Planalto Norte: é atendida por uma linha de transmissão em 138 kV, em circuito duplo, alimentado pelas Subestações Canoinhas e Joinville. A Região Sul, suprida principalmente pela Usina Térmica Jorge Lacerda, está conectada por dois circuitos em 230 kV que percorrem o Litoral. A Região Oeste é atendida pela rede de 500 kV pela Subestação de Campos Novos, Xanxerê e, em parte, pela Usina Térmica Jorge Lacerda.

Até o ano de 2015, estão previstas mais de 20 obras que atenderão todo o estado de Santa Catarina, sendo que nove deste montante já foram aprovadas e licitadas.

2.3.2 Equações de Modelo e Leis de Maxwell

A existência das ondas eletromagnéticas, previstas pelas equações de Maxwell, foi inicialmente investigada por Heinrich Hertz, vinte anos depois de Maxwell escrever suas equações [19]. A partir das equações de Maxwell é possível estudar a propagação de ondas eletromagnéticas em diferentes meios. Para o desenvolvimento das equações diferenciais do modelo de linhas de transmissão, serão empregadas duas representações. A primeira, um modelo mais simplificado, considera o meio dielétrico sem perdas e condutor ideal. Na segunda

representação, o meio dielétrico deverá ser homogêneo e o condutor não-ideal.

2.3.3 Linhas de Transmissão sem Perdas

Em linhas de transmissão os vetores de campo elétrico e magnético, criados pela linha no espaço que a envolve, não possuem componentes na direção de propagação da onda. Esta é uma característica do modo eletromagnético transversal “Transverse Electromagnetic Field” ou TEM, no qual os campos eletromagnéticos são ortogonais à direção de propagação. Portanto, uma vez que será considerada a direção de propagação no eixo z , os componentes E_z e H_z serão iguais à zero.

Imagina-se uma linha de transmissão formada por um condutor sólido, cilíndrico, de raio R , com altura h acima de um plano considerado ideal.

Expandindo os dois lados da equação de Maxwell, temos:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\vec{ax} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\vec{ay} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\vec{az} = -\frac{\partial B_x}{\partial t}\vec{ax} - \frac{\partial B_y}{\partial t}\vec{ay} - \frac{\partial B_z}{\partial t}\vec{az} \quad (2.3.1)$$

No caso de uma onda eletromagnética criada por uma linha de transmissão, o campo elétrico não tem componente na direção de propagação. Logo $E_z = 0$ e a equação (2.3.1) pode ser reduzida da seguinte forma:

$$\left(-\frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\vec{ax} + \left(-\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\vec{ay} = -\frac{\partial B_x}{\partial t}\vec{ax} - \frac{\partial B_y}{\partial t}\vec{ay} \quad (2.3.2)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial B_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \quad (2.3.3)$$

Particularizando a equação a seguir, calculamos o vetor campo elétrico entre o condutor e o plano terra.

Cabe lembrar que o lado esquerdo da equação (2.3.4) representa a força eletromotriz, ou a tensão $v(z, t)$ entre o condutor e o plano de terra na posição z e no instante de tempo t :

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.3.4)$$

$$v(z, t) = -\int_0^h (E_x dx + E_y dy) \quad (2.3.5)$$

Derivando a equação (2.3.5) em relação à z :

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -\int_0^h \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} dx + \frac{\partial E_y}{\partial z} dy \right) \quad (2.3.6)$$

Substituindo (2.3.3) em (2.3.6), tem-se a variação temporal do fluxo magnético que atravessa a superfície entre a linha e o plano de terra:

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h (-B_y dx + B_x dy) \quad (2.3.7)$$

De acordo com a definição de indutância, a integral que representa o fluxo pode ser definida como o produto das indutâncias interna e externa pela corrente $i(z, t)$ que circula na linha. Considerando o fluxo magnético interno e o fluxo externo ao condutor, chega-se, a partir de (2.3.7), à primeira equação básica do modelo de linha de transmissão:

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -L_{\text{int}} \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - L_{\text{ext}} \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (2.3.8)$$

Onde, L_{int} representa a indutância interna por unidade de comprimento, cuja unidade é o *Henry* por metro (H/m). A indutância externa é representada por L_{ext} .

A segunda equação pode ser desenvolvida com a mesma metodologia, mas a partir da seguinte equação de Maxwell.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

Uma vez que o condutor é ideal, não existem perdas associadas à circulação de corrente pelo condutor. A parcela de corrente responsável pelo rotacional de \mathbf{H} , ou pela variação do campo magnético, é a variação temporal de indução elétrica. A equação de Maxwell, apresenta-se então sob a seguinte forma:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.3.9)$$

Substituindo na equação (2.3.9) a relação constitutiva (2.1.2), vista no item 2.2, percebemos que a variação temporal do campo elétrico é responsável pela variação de \mathbf{H} .

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.3.10)$$

Expandindo os dois lados da equação acima:

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \vec{ax} + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{ay} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{az} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \vec{ax} + \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \vec{ay} + \varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \vec{az} \quad (2.3.11)$$

Como $H_x = 0$, no modo TEM, a equação (2.3.11) pode ser resolvida e reduzida da seguinte forma:

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.3.12)$$

Calculando a corrente $i(z,t)$ que flui no condutor, a partir da integral de linha circular do vetor do campo magnético \mathbf{H} ao redor do condutor, obtem-se:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint (H_x dx + H_y dy) \quad (2.3.13)$$

Derivando a equação (2.3.13), em relação à z :

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = \oint \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} dx + \frac{\partial H_y}{\partial z} dy \right) \quad (2.3.14)$$

Substituindo (2.3.12) na equação (2.3.14), chega-se à equação (2.3.15) que representa o fluxo elétrico que atravessa uma superfície cilíndrica delimitada por dois círculos normais ao condutor e ao plano terra.

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -\oint \left(\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} dx - \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} dy \right) \quad (2.3.15)$$

De acordo com a definição de capacitância, esta integral pode ser reescrita como o produto da capacitância pela tensão $v(t,z)$ na linha. Portanto, a equação (2.3.15) torna-se a segunda equação de modelo de linhas de transmissão:

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -C_0 \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (2.3.16)$$

onde C_0 é a capacitância, em *Farads* por metro.

Os parâmetros L_{int} , L_{ext} e C_o são definidos como parâmetros da linha de transmissão sem perdas e são determinados em função das dimensões da linha e das características do condutor e do dielétrico, da seguinte forma:

$$L_{int} = \frac{\mu}{8\pi} \quad (2.3.17)$$

$$L_{ext} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} \quad (2.3.18)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{R}} \quad (2.3.19)$$

Onde h representa a altura do condutor na torre, em relação ao solo e R o raio do condutor.

A solução das equações de modelo (2.1.6), (2.3.10) e (2.3.16), no domínio da frequência, obtidas a partir da notação de Euler para grandezas complexas, estão descritas nas equações a seguir.

$$\frac{dV(z)}{dz} = -j\omega (L_{int} + L_{ext}) I(z) \quad (2.3.20)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -j\omega C_0 V(z) \quad (2.3.21)$$

Estas equações descrevem um trecho infinitesimal da linha de transmissão e podem ser representadas no circuito equivalente da Figura 2.

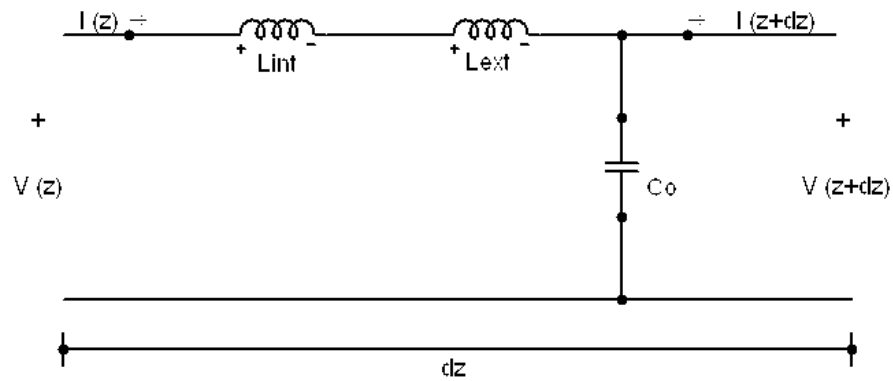


Figura 2. Circuito equivalente da linha de transmissão sem perdas

Derivando a equação (2.3.20) e substituindo a equação (2.3.21), chega-se ao coeficiente de fase da linha:

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = -j\omega (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) \frac{dI(z)}{dz} \quad (2.3.22)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = -j\omega C_0 \frac{dV(z)}{dz} \quad (2.3.23)$$

2.3.4 Linhas de Transmissão com Perdas

Diferente do item anterior, que considerava um condutor perfeito e um dielétrico sem perdas, será considerado, agora, um modelo de linha de transmissão real. O modo de propagação continuará sendo o TEM, entretanto, o meio dielétrico deverá ser homogêneo, o que implica em $H_z = 0$.

Considerando uma linha de transmissão formada por um condutor cilíndrico, não ideal, de raio R , localizado a uma altura h em relação ao solo. O meio de propagação não é ideal.

Como no item anterior, chega-se à:

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial B_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial B_y}{\partial t} \quad (2.3.24)$$

Partindo da integral de linha do campo elétrico \mathbf{E} , entre o condutor e o plano terra, que fornece a tensão entre o condutor e plano terra, como no item 2.3.3:

$$V(z, t) = -\int_0^h (E_x dx + E_y dy) \quad (2.3.25)$$

Derivando a equação em relação à z :

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = -\int_0^h \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} dx + \frac{\partial E_y}{\partial z} dy \right) \quad (2.3.26)$$

Substituindo as equações (2.3.24) na (2.3.26):

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -\int_0^h \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial B_x}{\partial t} \right) dx - \int_0^h \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial B_y}{\partial t} \right) dy \quad (2.3.27)$$

Expandindo:

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -\int_0^h \frac{\partial E_z}{\partial y} dx - \int_0^h \frac{\partial B_x}{\partial t} dx - \int_0^h \frac{\partial E_z}{\partial x} dy + \int_0^h \frac{\partial B_y}{\partial t} dy \quad (2.3.28)$$

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h E_z dx - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h E_z dy - \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h (-B_y dy + B_x dx) \quad (2.3.29)$$

Onde o primeiro termo da equação (2.3.29) é nulo. O segundo termo representa a diferença do campo elétrico do condutor em relação ao solo e o último termo representa o fluxo magnético que atravessa a superfície entre o condutor e o solo.

Lembrando que a indutância da linha pode ser definida como a força eletromotriz induzida por uma determinada variação de corrente [4], ou o produto da corrente pelo fluxo magnético, chega-se à primeira equação de modelo de linhas de transmissão com perdas:

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -R_0 i(z,t) - L_{\text{int}} \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - L_{\text{ext}} \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (2.3.30)$$

Onde R_0 (Ω/m) é a resistência do condutor da linha, por unidade de comprimento.

Da mesma forma, a circulação do campo magnético \mathbf{H} pode ser calculada a partir da equação de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

Neste caso, porque foi considerado um condutor real, a densidade de corrente \mathbf{J} não deve ser desprezada. Portanto, ao expandir a equação de Maxwell, obtém-se:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \vec{ax} + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{ay} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{az} = \\ & (J_x + \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}) \vec{ax} + (J_y + \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}) \vec{ay} + (J_z + \varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}) \vec{az} \end{aligned} \quad (2.3.31)$$

Como o modo de circulação é TEM, $H_z = 0$. Então:

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = J_x + \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{\partial H_x}{\partial z} = J_y + \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.3.32)$$

Calculando a integral de linha da circulação de campo magnético, chega-se à circulação de corrente I , como vimos no item 2.1.1:

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I(z, t) = \oint (H_x dx + H_y dy) \quad (2.3.33)$$

Derivando a equação acima:

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = \oint \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} dx + \frac{\partial H_y}{\partial z} dy \right) \quad (2.3.34)$$

Substituindo a equação (2.3.32), em (2.3.34)

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = \oint \left[(J_y + \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}) dx - (J_x + \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}) dy \right] \quad (2.3.35)$$

Rearranjando os termos:

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = \oint \left(J_y dx - J_x dy + \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} dx + \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} dy \right) \quad (2.3.36)$$

Onde os termos da equação, que contêm \mathbf{J} , representam a parcela de corrente de condução através do dielétrico, provocada pela tensão $V(z, t)$ da linha. Os dois últimos termos representam a corrente devido à variação do fluxo elétrico que atravessa uma superfície entre a linha e o solo, representam, portanto, o valor da corrente devido à variação de tensão. De acordo com a definição de capacitância e de condutância, a equação (2.3.36), pode ser reescrita na forma abaixo, que representa a segunda equação de modelo de linhas de transmissão:

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -G_0 V(z,t) - C_0 \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (2.3.37)$$

Onde G_0 , que representa a condutância do dielétrico, é dado em *Siemens* por metro e C_0 , que representa a capacitância em *Farads* por metro.

As equações estão repetidas a seguir.

$$-\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = R_0 I(z,t) + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (2.3.38)$$

$$-\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = G_0 V(z,t) + C_0 \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (2.3.39)$$

A figura abaixo ilustra o equivalente da linha, considerando as perdas.

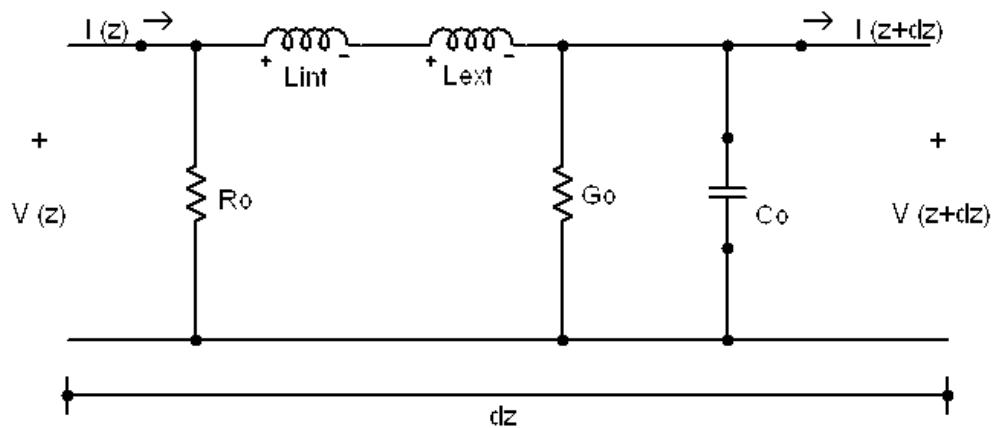


Figura 3. Circuito equivalente da linha de transmissão com perdas

Diferenciando (2.3.38) com relação à z e (2.3.39) com relação à t :

$$-\frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial z^2} = R_0 \frac{\partial I(z,t)}{\partial z} + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) \frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z \partial t} \quad (2.3.40)$$

$$-\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z \partial t} = G_0 \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} + C_0 \frac{\partial^2 V(z)}{\partial t^2} \quad (2.3.41)$$

Derivando (2.3.38) com relação à t e (2.3.39)(2.3.47) com relação à z :

$$-\frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial z \partial t} = R_0 \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) \frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial t^2} \quad (2.3.42)$$

$$-\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z^2} = G_0 \frac{\partial V(z,t)}{\partial z} + C_0 \frac{\partial^2 V(z)}{\partial z \partial t} \quad (2.3.43)$$

Por substituição direta, chega-se às equações diferenciais das linhas de transmissão:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial z^2} &= R_0 G_0 V(z,t) + [R_0 C_0 + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) G_0] \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} + \\ &+ (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) C_0 \frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.3.44)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z^2} &= R_0 G_0 I(z,t) + [R_0 C_0 + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) G_0] \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + \\ &+ (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) C_0 \frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.3.45)$$

No domínio da frequência, as equações (2.3.44) e (2.3.45) tornam-se:

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = R_0 G_0 V(z) + j\omega [R_0 C_0 + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) G_0] V(z) + (j\omega)^2 (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) C_0 V(z) \quad (2.3.46)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = R_0 G_0 I(z) + j\omega [R_0 C_0 + (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) G_0] I(z) + (j\omega)^2 (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}) C_0 I(z) \quad (2.3.47)$$

Que podem ser descritas na forma a seguir.

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = (R_0 + j\omega L)(G_0 + j\omega C_0) V(z) \quad (2.3.48)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = (R_0 + j\omega L)(G_0 + j\omega C_0) I(z) \quad (2.3.49)$$

Ou ainda,

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} = \gamma^2 V(z) \quad (2.3.50)$$

Onde γ é o coeficiente de propagação da linha que governa a forma pela qual as correntes e tensões se propagam ao longo da linha. Sua parte real, representada por α , é conhecida como constante de atenuação e representa as perdas de energia da linha. A parte imaginária, β , é chamada constante de fase, pois indica a forma como as fases de tensão e de corrente variam ao longo da linha [14].

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega(L_{\text{int}} + L_{\text{ext}}))(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (2.3.51)$$

Dada a sua forma, a solução das equações diferenciais (2.3.48) e (2.3.49) é do mesmo tipo. Uma solução para a equação (2.3.50) é apresentada abaixo

$$V(z) = V_1 e^{\gamma z} + V_2 e^{-\gamma z} \quad (2.3.52)$$

Derivando em z :

$$\frac{dV(z)}{dz} = \gamma(V_1 e^{\gamma z} - V_2 e^{-\gamma z}) \quad (2.3.53)$$

Tomando a equação (2.3.38) no domínio da frequência:

$$-\frac{dV(z)}{dz} = [R_0 + j\omega(L_{\text{int}} + L_{\text{ext}})] I(z) \quad (2.3.54)$$

E substituindo (2.3.53) na equação (2.3.54), chega-se a:

$$I(z) = \frac{\gamma V_2 e^{-\gamma z}}{[R_0 + j\omega(L_{\text{int}} + L_{\text{ext}})]} - \frac{\gamma V_1 e^{\gamma z}}{[R_0 + j\omega(L_{\text{int}} + L_{\text{ext}})]} \quad (2.3.55)$$

ou,

$$I(z) = \frac{\gamma V_2 e^{-\gamma z}}{Z_0} - \frac{\gamma V_1 e^{\gamma z}}{Z_0} \quad (2.3.56)$$

onde Z_0 representa a impedância característica da linha, e vale:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega (L_{\text{int}} + L_{\text{ext}})}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (2.3.57)$$

As variáveis V_1 e V_2 correspondem às ondas viajando no sentido negativo e positivo da linha e podem ser obtidas matematicamente através das condições de contorno. Considerando uma linha sem reflexões, terminada em uma carga igual a Z_0 ($Z_{\text{carga}} = Z_0$), alimentada por uma fonte de tensão V a equação (2.3.52) torna-se:

$$V(z) = V e^{-\gamma z} \quad (2.3.58)$$

A corrente, neste caso é:

$$I(z) = \frac{V}{Z_0} e^{-\gamma z} \quad (2.3.59)$$

Para uma fonte V senoidal, onde:

$$V = V_m e^{j\omega t} \quad (2.3.60)$$

Logo:

$$V(z, t) = V_m e^{-\alpha z} e^{-j(\omega t - \beta z)} \quad (2.3.61)$$

$$I(z, t) = \left(\frac{V_m}{Z_0} \right) e^{-\alpha z} e^{-j(\omega t - \beta z)} \quad (2.3.62)$$

2.3.5 Características Físicas

O desempenho de uma linha de transmissão depende de sua geometria, ou seja, das suas características físicas. O emprego de determinado cabo, por exemplo, não só assegura um bom desempenho da linha, como tem importantes aplicações de natureza econômica [14]. De modo análogo, as estruturas

utilizadas determinam o comportamento da linha de transmissão a surtos de qualquer natureza [14].

A seguir, será feita uma breve discussão sobre as características mecânicas e elétricas das linhas de transmissão.

2.3.5.1 Cabos Condutores

Os cabos condutores utilizados em linhas de transmissão são formados pelo encordoamento de fios elementares e são padronizados segundo o número de filamentos e às suas secções. Normalmente, empregam-se cabos de alumínio dispostos em camadas, com ou sem alma de aço. Segundo as normas NBR 7270 e NBR 7271, especificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas [20], utiliza-se a sigla CAA para designar os cabos de alumínio com alma de aço e CA para os cabos que possuem apenas fios de alumínio.

A nomenclatura empregada no Brasil para identificar estes tipos de condutores segue padrões canadenses, que utiliza nome de flores para designar cabos CA de diferentes bitolas e nomes de pássaros para os cabos CAA, ambos em inglês.

Em linhas de transmissão com tensão superior a 220kV, empregam-se feixes de condutores em cada fase da linha, a fim de melhorar o desempenho quanto ao gradiente de tensão e, conseqüentemente, quanto à rádio-interferência provocada pela linha. O número de condutores por feixe, assim como o espaçamento entre os condutores do feixe, também são importantes no desempenho das linhas de transmissão.

2.3.5.2 Estruturas

As estruturas da linha de transmissão constituem os elementos de sustentação dos cabos condutores, dos cabos pára-raios e demais elementos como isoladores e ferragens.

Quanto ao tipo de esforço as estruturas são classificadas em dois grupos: autoportante e estaiada. A primeira transmite todos os esforços diretamente para suas fundações. A última é enrijecida através de tirantes ou estais.

2.3.5.3 Cabos Pára-Raios

Os cabos pára-raios, em geral de aço galvanizado, têm como objetivo interceptar as descargas atmosféricas e correntes de curto-circuito e descarregá-las para o solo, evitando danos e interrupções ao sistema. Seu diâmetro varia de 3/8" a 1/2" e podem ser aterrados diretamente à estrutura ou isolados através de isoladores de baixa resistência disruptiva e usados para comunicação [14]. Seu dimensionamento é baseado em sua suportabilidade térmica durante a ocorrência de curto-circuito envolvendo a terra em que há rompimento do dielétrico da cadeia de isoladores. Nessas condições a corrente de falta flui para a terra pela estrutura metálica da torre e através dos cabos [21].

2.4. Corrente de Curto-Circuito

As linhas de transmissão são projetadas para atender à cargas de maneira segura. Uma das considerações principais no projeto é o controle adequado das correntes de curto-circuito ou correntes de falta, como são chamadas habitualmente.

Curto-circuitos são causados por falhas na isolação de um circuito, ocasionando, em muitos casos, um arco elétrico no ponto da falha. Duração prolongada dos arcos de tensão pode resultar em sobre-tensões, que põem em perigo a isolação do sistema ou equipamentos em outras partes da linha. Além disso, os campos eletromagnéticos a que os condutores estão sujeitos, gerados a partir das correntes de curto-circuito, podem sujeitar toda a linha de transmissão à tensões mecânicas severas, além de afetar objetos próximos à linha onde ocorre a falta, induzindo níveis de tensão, proporcionais à magnitude da corrente. A máxima tensão ocorre no local da falta [22].

A corrente de curto-circuito adotada em uma linha de transmissão é definida como o maior valor possível que uma corrente de curto pode alcançar em determinado ponto da linha. Seu valor, que pode chegar a 50 kA, está associado ao tamanho e capacidade das fontes de potência que atendem a linha e independe da corrente de carga do circuito. Quanto maior a capacidade das fontes de potência que alimentam o sistema, maior a intensidade da corrente de curto. Os principais fatores que determinam a

intensidade e duração das correntes de curto-circuito são o tipo da falta, fontes de correntes de falta presentes no sistema, o aterramento da linha e a impedância entre o ponto de falta e as fontes do sistema.

Máquinas síncronas, motores de indução e geradores, presentes na linha, são as principais fontes de correntes de curto-circuito. No instante da falta, máquinas síncronas e motores de indução agem como geradores e injetam corrente de curto-circuito no sistema, proporcional à quantidade de energia elétrica liberada no momento de falta.

2.5. Dutos

2.5.1. Histórico e Perfectivas Futuras do Gás Natural

A descoberta tardia de reservas em território nacional fez do uso de gás natural uma prática bem recente no Brasil. Somente nos últimos 20 anos, a produção e a oferta interna de gás natural vêm apresentando um crescimento mais significativo. Segundo análises realizadas pela ANP (2004) durante os anos de 1964 e 2001, as reservas de gás natural cresceram a uma taxa média de 6,8% ao ano [23]. Em 2004 as reservas provadas de gás natural totalizavam 313,1 bilhões de metros cúbicos de gás, sendo o sul e o sudeste responsáveis por 215,6 bilhões [24].

A capacidade atualmente instalada no Brasil pode processar 21,6 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia, devendo os

novos investimentos garantir uma disponibilidade incremental de 19 milhões de metros cúbicos por dia. Essas capacidades totalizam, aproximadamente, 40 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural processado [25]. A participação do gás natural na matriz energética brasileira atualmente é de cerca de 9% [26] e a meta do governo brasileiro é aumentar esta participação para 10,0%, até 2010. Na região Sudeste, Sul e Centro Oeste esperam-se um potencial de consumo em torno de 49 milhões de m³/ dia. [26]. A estratégia governamental de aumentar a participação do Gás Natural na matriz energética do Brasil implica na construção de infra-estrutura de transporte e distribuição, capaz de levar o gás de suas zonas produtoras aos mercados consumidores [27].

“Uma das principais especificidades da indústria do Gás Natural (Indústria de Gás Natural) é a importância do segmento de transporte e distribuição na formação dos custos deste energético. O Gás Natural (GN) tem um volume 1000 vezes superior ao do petróleo, o que implica na necessidade de uma grande infra-estrutura de transporte e para viabilizar o seu consumo” [27].

As maiores reservas do continente sul-americano, entretanto, estão localizadas na Venezuela (61,5%), na Bolívia (10,5%) e na Argentina (7,2%). O Brasil, por sua vez, apresenta potencial para ser o principal mercado consumidor de gás natural do continente, principalmente em função do consumo potencial da região sudeste do país e concentrando-se no abastecimento dos mercados industrial e de geração de energia elétrica. Um gráfico

demonstrando a evolução do consumo energético do gás natural pode ser observado a seguir.

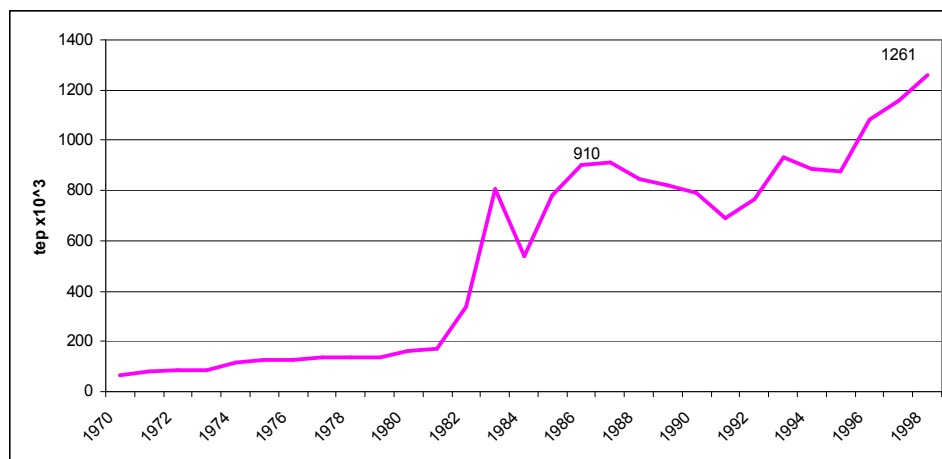


Figura 4. Evolução do Consumo Energético de Gás Natural
(FONTE: MME)

A construção de novos gasodutos durante os anos 90, em especial o Bolívia-Brasil, representou um marco na expansão da oferta de gás natural, proporcionando uma integração dos mercados regionais às áreas de produção, tanto nacionais como internacionais. Adicionalmente, a expansão da rede de abastecimento deve potencializar o aproveitamento da crescente produção nacional e o acesso ao gás importado.

Segundo Vilas Boas (2004), à primeira vista, as condições para a integração dos mercados gasíferos na América do Sul estão todas presentes. De um lado, há reservas significativas de gás natural na região e, de outro, uma forte expectativa quanto ao crescimento da demanda pelo energético, principalmente devido à tendência do crescimento da geração termelétrica de eletricidade. Além disso, a localização das reservas e dos

mercados e a diversidade de estruturas de demanda e de climas, oferecem ao Cone Sul, relevante potencial de integração [28].

A expansão da rede de transporte de gás natural no país pode ser analisada a partir da

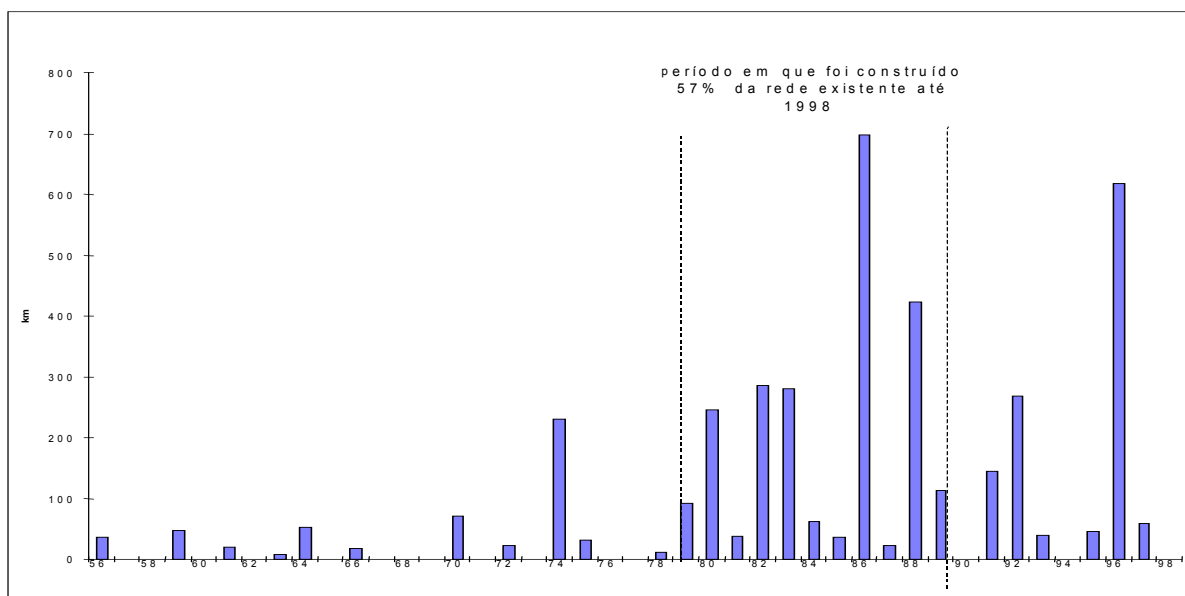


Figura 5.

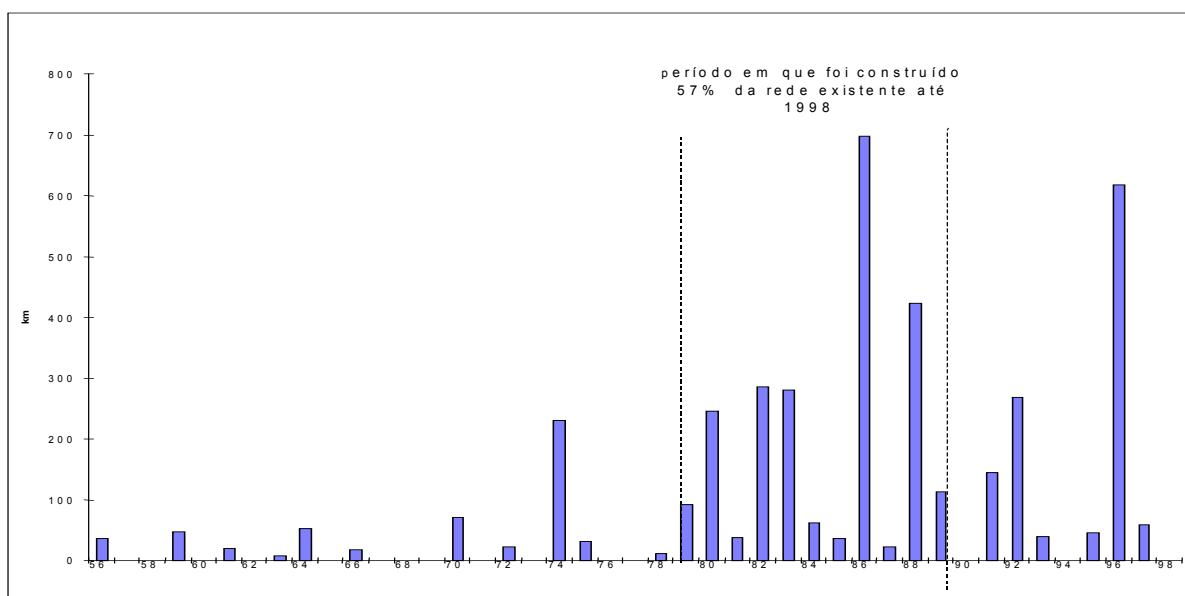


Figura 5: Expansão da Rede Nacional de Gasodutos (FONTE: MME)

Atualmente, a malha responsável pelo escoamento do gás natural nacional está subdividida em quatro malhas que cobrem regiões específicas do país. Cada malha é constituída por gasodutos com diâmetro e capacidade de escoamento distintos. A Malha I, que compreende os trechos do Gasoduto Guamaré–Pecém, (382 km) e Guamaré–Cabo (424 km) e Alagoas-Pernambuco, atende os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. A Malha II, que atende os Estados de Sergipe e Bahia, é formada pelos gasodutos Atalaia–Catu (232 km), o Santiago–Camaçari I (32 km), o Santiago–Camaçari II (32 km), o Candeias–Camaçari (37 km) e o Aratu–Camaçari (20 km). A Malha III, atende, exclusivamente, ao Estado do Espírito Santo e é composta pelos Gasodutos Lagoa Parda–Aracruz (38 km), Aracruz–Vitória (73,8 km) e Serra–Viana (30 km). Por fim, a Malha IV atende os Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo e movimenta a maior quantidade do gás natural produzido no Brasil. Esta malha é composta pelos seguintes gasodutos: Cabiúnas–Reduc (183 km), Reduced–Regap (357 km), Reduced–Esvol (95,2 km), Esvol–Tevol (5,5 km), Esvol–São Paulo (325,7 km), RPBC–Capuava (37 km) e RPBC–Comgás (1,5 km) [25].

Já o perfil dos gasodutos que suportam os projetos de importação de gás natural da Bolívia e da Argentina é mais disperso: Gasoduto Uruguaiana – Porto Alegre e Gasoduto Cruz del Sur (atendendo o Estado do Rio Grande do Sul), Lateral Cuiabá (atendendo o Estado do Mato Grosso), Gasoduto Bolívia – Brasil

(atendendo os estados do Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul).

2.5.2. Gasoduto Brasil-Bolívia

O gasoduto Brasil-Bolívia foi um importante passo para o campo industrial brasileiro, gerando um aumento considerável de oferta de gás natural no país. Operado pela Transportadora Brasileira Gasoduto Brasil-Bolívia S/A -TBG, este gasoduto, com 2.593 km de extensão no território nacional e 557 km na Bolívia, tem capacidade de transporte de até 30 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia (capacidade do gasoduto em 2007). Sua rede de distribuição é formada por tubos de aço carbono de 16 a 32 polegadas de diâmetro e atravessa os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e beneficia indiretamente Rio de Janeiro e Minas Gerais. O custo total do investimento foi de US\$ 2 bilhões.

Em Santa Catarina o gás boliviano é fornecido às empresas instaladas na Região Norte do Estado, Vale do Itajaí, Grande Florianópolis e Região Sul. É relevante também o abastecimento da Termelétrica Catarinense Norte e a criação de condições favoráveis para o surgimento de um pólo cerâmico em Campo Alegre [29].

2.6. Interferência Eletromagnética

A análise dos efeitos de linhas e transmissão em dutos, linhas de comunicação ou estruturas similares tem resultado em inúmeros estudos nos últimos anos. No Canadá, esta preocupação levou a publicação de uma norma em 1978 sobre dutos e linhas de transmissão dividindo o mesmo corredor. Esta norma, intitulada *Principles and Practices of Electrical Coordination Between Pipelines and Electric Supply lines* foi revisada e atualizada em 1991. Na Europa o grupo CIGRE Working Group 36.02, produziu uma versão preliminar em 1992 de um documento intitulado “Guia Influência de Linhas de corrente alternada de alta tensão em dutos metálicos [30][31].

Cálculos de interferência consistem, essencialmente, no cálculo de interferência indutiva (campos magnéticos) e no cálculo de interferência condutiva (campos elétricos), os quais são feitos de forma independente. Ambas as interferências são lineares, portanto, se as correntes resultantes destas duas interferências são conhecidas, elas podem ser adicionadas por superposição para se conhecer o valor total da interferência. O valor final, considerando o acoplamento entre a interferência indutiva e a condutiva, entretanto não é um valor exato, portanto a superposição dos valores calculados de forma independente é apenas uma aproximação. Por outro lado, como correntes circulando em dutos, devido à interferência condutiva são,

tipicamente, pelo menos uma ordem de magnitude maiores do que aquelas causadas pela indução magnética, os erros resultantes da superposição serão pequenos para aplicações práticas, ou seja, com a exatidão necessária para aplicações em engenharia [32].

Durante as condições normais de carga em uma linha de potência, apenas a componente indutiva, resultante do campo magnético gerado pelos condutores da linha, está presente. Entretanto, as maiores tensões são induzidas no duto durante um curto-circuito fase-terra, quando há uma elevada corrente de curto-circuito circula ao longo da linha. O nível desta interferência aumenta à medida que a distância e o ângulo de cruzamento entre o duto e a linha diminuem ou quando a resistividade do solo aumenta. Um acréscimo na magnitude da corrente e na frequência do condutor energizado, também provoca uma interferência mais acentuada nos dutos, devido à linha de transmissão de potência [1].

Quando uma falta da fase para a terra ocorre em uma linha de transmissão, a estrutura onde ocorreu a falta injeta uma corrente elevada na terra e correntes de curto-circuito passam a circular pelos cabos pára-raios das torres e pelas resistências de aterramento. Neste caso, ocorrem os dois tipos de interferência.

Tanto a corrente circulando pelos cabos condutores quanto a corrente circulando pelos cabos pára-raios e pelas resistências de aterramento das torres, induzem tensão no duto. Em ambos os casos se produzem campos magnéticos e campos elétricos não desejados que são a origem das tensões induzidas (Ver item 2.1.2).

As tensões induzidas devido ao acoplamento condutivo se devem à parcela de corrente que escoar para o solo, através das resistências de aterramento, durante um curto-circuito. Se a cobertura do duto, próximo à linha, tem uma resistividade elevada, o potencial induzido no duto será baixo. A diferença de potencial entre o duto e a terra que o cerca representa a parcela de interferência condutiva. A intensidade da interferência condutiva é função da estrutura da linha, da distância de separação com o duto, do sistema de aterramento e da composição do solo [33].

As correntes de curto-circuito podem ser divididas em duas componentes [33]. A componente auto-neutralizada (IR), também chamada de “corrente residual”, circula ao longo de todo o comprimento da linha, desde o ponto de falta até os neutros dos transformadores nas subestações terminais, sem difundir-se pela terra. A componente não neutralizada (IG), também chamada de “corrente de terra”, difunde-se pela terra através das resistências de aterramento das torres, por cerca de 5 a 15 km de ambos os lados do ponto de falta [33]. Esta extensão corresponde a aproximadamente três vezes o comprimento característico, também chamado de constante de espaço (CE), do circuito de aterramento da linha, formado pelos cabos pára-raios e pelas resistências de aterramento das torres. O comprimento característico é a distância, a partir do ponto de falta, necessária para que a tensão seja reduzida para 36,8% do seu valor original, na torre de curto-circuito [34][35].

O máximo valor de corrente circulando para a terra ocorre no ponto de falta. Nas torres subsequentes o valor da corrente diminui exponencialmente, de tal modo que após percorrer a distância de 3 CE, quase toda a corrente não neutralizada (IG) já fluiu para a terra, restando apenas a corrente residual (IR) circulando pelos pára-raios.

Corrente de fase induz tensão ao longo do duto. Corrente de curto-circuito (IG+IR) circulando na direção oposta, reduz a intensidade da tensão induzida no duto devido à corrente de fase. Por esta razão, as correntes de curto também são chamadas de corrente de proteção. A extensão, ao longo da rede de aterramento, na qual apenas a componente auto-neutralizada (IR) está circulando é chamada de região de mínima proteção. Esta região induz o valor máximo de tensão no duto, devido à corrente de fase.

Nas proximidades das subestações, a corrente não-neutralizada é absorvida pela terra por uma distância de 5 a 15 km das subestações. Esta distância é conhecida como constante de espaço (CE). O máximo valor da corrente ocorre na primeira torre próxima à subestação.

O máximo valor da corrente de proteção ocorre nas vizinhanças da torre de falta e próximas às subestações terminais. Estas regiões não induzem uma tensão elevada no duto, devido ao acoplamento indutivo. Entretanto nestas regiões as correntes injetadas no solo, através das resistências de aterramento das torres, são muito elevadas. Então quando um duto se aproxima da

torre de falta ou das torres próximas às subestações terminais, uma elevada tensão pode ser induzida no duto devido ao acoplamento condutivo.

São três as condições críticas de curto-circuito para cruzamento de linhas de transmissão com dutos [33]:

- Falta na torre mais próxima ao cruzamento da LT com o duto.

Esta condição resulta na máxima diferença de potencial induzido no duto devido ao acoplamento condutivo. Neste caso, o acoplamento indutivo é pequeno, uma vez que a corrente de proteção é elevada.

- Falta a uma distância de até 3 CE do cruzamento (5 a 15 km)

É nesta região onde a tensão induzida no duto devido ao acoplamento indutivo é máxima, uma vez que a corrente de proteção é mínima, pois só a componente residual (IR) está circulando na rede de aterramento.

- Falta em um ponto intermediário entre as duas condições supracitadas.

Esta condição combina os dois tipo de acoplamento.

3. METODOLOGIA

A fim examinar os efeitos elétricos e magnéticos que podem agir sobre um duto, devido à linhas de transmissão, será simulada a condição mais desfavorável em exame, correspondente ao curto-circuito fase-terra na torre mais próxima ao gasoduto, no vão onde cruza com a diretriz da linha. Para isso, será utilizado o programa ATP.

Dentre os algoritmos utilizados para simulação de linhas de potência, os mais utilizados são os programas do tipo EMTP, como o ATP. Com uma representação adequada do sistema a ser simulado, os programas do tipo EMTP são uma poderosa ferramenta para modelar vários tipos de sistema. Uma vez que permitem soluções no domínio do tempo, a interação dinâmica entre uma linha de potência e elementos do resto do sistema pode ser facilmente incorporada à simulação. Além disso, consideram elementos não lineares, como transformadores, controladores e pára-raios [36] [42].

As simulações da elevação de potencial no duto, por ocasião de um curto-circuito na linha de transmissão foram feitas utilizando o ATP.

3.1. UM Breve Histórico do ATP

O ATP é programa universal para simulação digital de fenômenos de natureza eletromagnética. Através deste programa, redes

complexas e sistemas de controle de estruturas arbitrárias podem ser simulados.

O ATP (*Alternative Transients Program*), ou Programa de transitórios eletromagnéticos, foi desenvolvido por Scott Meyer a partir do programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) da Bonneville Power Administration.

Na década de 60, Herman W. Dommel desenvolveu o programa EMTP, que trabalhava com simulação de circuitos monofásicos, através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal enquanto as linhas de transmissão, o método Bergeron.

Quando Scott Meyer assumiu a coordenação do programa na BPA, no ano de 1973, e estabeleceu um processo de desenvolvimento articulado com os usuários, possibilitando a inclusão de novos modelos, experiências e sugestões, promoveu o enriquecimento do programa, tornando-o uma ferramenta poderosa para estudos de fenômenos transitórios. Um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento do EMTP, neste período, foi o estabelecimento de uma matriz, a partir da qual eram executadas as translações para os computadores de interesse.

Sendo a BPA uma empresa pública, o EMTP sempre foi distribuído gratuitamente, sendo necessária apenas licença de uso, o que rapidamente permitiu sua difusão pelo mundo.

Em 1982, foi criado o *Development Coordination Group*, com a participação da BPA, *Bureau of Reclamation, Western Area Power Administration, Ontario Hydro, Hydro Quebec, Canadian Electrical Association* e ASES, tendo por finalidade melhorar a documentação e os modelos existentes, assim como a criação de novos modelos. Após dois anos de trabalho o grupo lançou a versão M39, tornando-o propriedade exclusiva de seus componentes [38].

Como o programa só passaria a ser objeto de utilidade pública três anos após seu lançamento, devido a preceitos norte-americanos, Scott Meyer criou uma versão baseada na versão M39 [39], denominada ATP. Nessa mesma época foi instalado o *Leuven EMTP Center*, na Universidade Leuven, na Bélgica, que assumiu o papel de distribuidor mundial do programa até 1992, quando a BPA voltou ao controle do programa. Atualmente existem grupos de usuários do EMTP na América do Norte, Europa, Índia, Japão, Austrália, e América-Latina. O ATP é a versão mais utilizada do EMTP atualmente e vem continuamente sendo aprimorado Drs. W. Scott Meyer e Tsu-huei Liu, the co-Chairmen of the Canadian/American EMTP User Group [39][40].

3.2. Informações Gerais

O programa ATP, atualmente, permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com diferentes configurações, por um método que utiliza a matriz de admitância

de barras. A partir da solução de equações diferenciais ordinárias, utiliza integração trapezoidal para simular parâmetros concentrados e o método de Bergeron (método das características) para calcular parâmetros distribuídos de uma linha de transmissão. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes [3]. A regra trapezoidal é utilizada no ATP para converter as equações diferenciais que representam os componentes da linha, em simples relações algébricas envolvendo tensão e corrente [41].

Por ser um programa digital, não permite obter uma solução contínua no tempo, sendo calculados valores a intervalos de tempo discretos, dependendo do tipo de fenômeno eletromagnético estudado. A precisão da solução depende do passo de tempo utilizado na regra de integração [41][42].

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, entre outros, servindo bem ao propósito desta dissertação. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e parâmetros em sequência zero e positiva, de acordo com o modelo aplicado.

O ATP se divide em dois grandes programas principais, o ATPSIM e o ATPSUP. O primeiro é o responsável pelas simulações propriamente ditas e determina, por exemplo, as tensões e correntes envolvidas no estudo. O segundo é utilizado

para cálculos suplementares, como o cálculo da matriz impedância da linha, cujos resultados serão utilizados para modelar o sistema no ATPSIM [43].

3.3. Padronização das Linhas de Transmissão no ATP

As linhas de transmissão apresentam parâmetros distribuídos ao longo de sua extensão e possuem forte dependência com a frequência, logo podem ser modeladas de diferentes formas, dependendo da precisão esperada [44].

Diferentes modelos computacionais são disponibilizados no ATP para representar linhas de transmissão. Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as linhas de transmissão podem ser representadas por modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos. No que se refere à dependência dos parâmetros da linha com a frequência, o ATP disponibiliza modelos com parâmetros constantes ou dependentes da frequência. Além disso, linhas de transmissão polifásicas podem ser modeladas no domínio modal ou no domínio das fases.

No Brasil os modelos mais utilizados para representação das linhas de transmissão são os modelos nodais, a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. Além das razões históricas e técnicas, a maior motivação para se fazer uso destes modelos reside no fato de que praticamente todo o Sistema Interligado Nacional (SIN) encontra-se modelado desta forma.

Os modelos nodais, propostos na década de 60, fazem uso da técnica da transformação modal [45], que utiliza o cálculo de autovalores e autovetores, das matrizes que caracterizam a linha, para desacoplar as fases de uma linha polifásica. Trabalhando com várias linhas monofásicas independentes estes modelos facilitam o cálculo de fenômenos eletromagnéticos.

A simulação de fenômenos eletromagnéticos implica, além da seleção do modelo apropriado, a área do sistema a ser representada [46]. A quantidade de seções de linha a ser representada irá influenciar no resultado, provocando uma maior ou menor distorção dos resultados. Embora novas interfaces gráficas permitam ao usuário representar redes muito grandes, um grande número de componentes não significa, necessariamente, maior precisão, uma vez que acarreta uma probabilidade maior de erro. Além disso, uma representação muito detalhada de um sistema exigirá um tempo mais longo de simulação.

De acordo com as recomendações do Grupo de Trabalho 33.02 de CIGRE [47] e com diretrizes propostas no guia de utilização do programa [48] a melhor representação da linha aérea para a simulação de linhas de transmissão longas, é utilizar cálculos com parâmetros de resistência, capacitância e indutância distribuídos ao longo da linha, uma vez que essa situação fornece a melhor solução para os cálculos do sistema em estudo [40][43]. Para a finalidade deste trabalho, foi selecionado um circuito real do sistema de distribuição em 525 KV. A tensão, tomada como

tensão de referência para expressão dos valores em p.u (por unidade) [50] foi de 550kV para condição de regime permanente.

3.3.1. Descrição das Características da Linha

A LT 525kV Campo Novos – Blumenau, pertence às obras de ampliação do suprimento de energia do estado de Santa Catarina e será seccionada para entrada na futura Subestação de Biguaçu.

O edital de licitação desta obra foi realizado em junho de 2004. Neste edital foi licitada a concessão para prestação do serviço público de transmissão de energia de onze lotes, sendo o LOTE K correspondente à LT Campos Novos – Blumenau em 525KV. Esta instalação é composta pela linha de transmissão em 525kV, circuito duplo, com extensão aproximada de 375 km, com origem na Subestação Campos Novos e término na Subestação Blumenau e compreende dois segmentos de linha. Um trecho, de aproximadamente 280 km, da Subestação Campos Novos até o município de Biguaçu, onde futuramente haverá uma subestação e um trecho de aproximadamente 95 km deste município até a Subestação Blumenau. Todas as simulações foram feitas levando-se em consideração esta interligação.

O sistema consiste em uma linha trifásica com 4 condutores tipo CAA 954 kcmil 45/7, código RAIL, por fase, espaçados em 0,457 m, operando na tensão máxima de 525 kV. A temperatura de operação da Linha é de 75°C.

Os pára-raios utilizados, são distribuídos da seguinte forma:

Dois cabos do tipo ACC 176,91 kcmil 12/7, código DOTTEREL são utilizados nos primeiros 4,49 km, a partir da Subestação de Biguaçu. Neste ponto, ocorre a primeira troca dos cabos pára-raios, sendo um DOTTEREL substituído por 1 cabo de aço galvanizado 9,13 mm (3/8") EAR (EHS), nos próximos 29,4 km. A segunda troca ocorre à 79,9 km da subestação de Biguaçu, cerca de 46 km depois da primeira troca. O cabo DOTTEREL restante é substituído por 1 cabo de aço galvanizado 9,13 mm (3/8") EAR (EHS). Esta configuração, contendo dois cabos do tipo EAR, se mantém por 7,2km. Os cabos de aço são substituídos por dois cabos do DOTTEREL a 3,4 km da Subestação de Blumenau.

O cabo condutor do tipo RAIL tem diâmetro de 29,59 mm. Sua resistência elétrica, na temperatura de operação da linha, neste caso 65°C, é de 0,0707 Ω /km. A reatância indutiva interna é igual a 0,245 Ω /km, segundo dados do fabricante.

A resistência do cabo pára-raios DOTTEREL, na sua temperatura de operação (40°C), é igual a 0,375 Ω /km e a reatância indutiva interna vale 0,316 Ω /km.

O cabo de aço galvanizado (3/8"), tem resistência elétrica a 40°C igual a 3,73 Ω /km e reatância indutiva interna igual a 0,518 Ω /km.

A silhueta da torre (perfil de cada torre utilizada como sustentação dos cabos de transmissão de energia elétrica e cabos de proteção contra descargas atmosféricas) é mostrada na figura abaixo, ilustrando a disposição dos condutores no espaço.

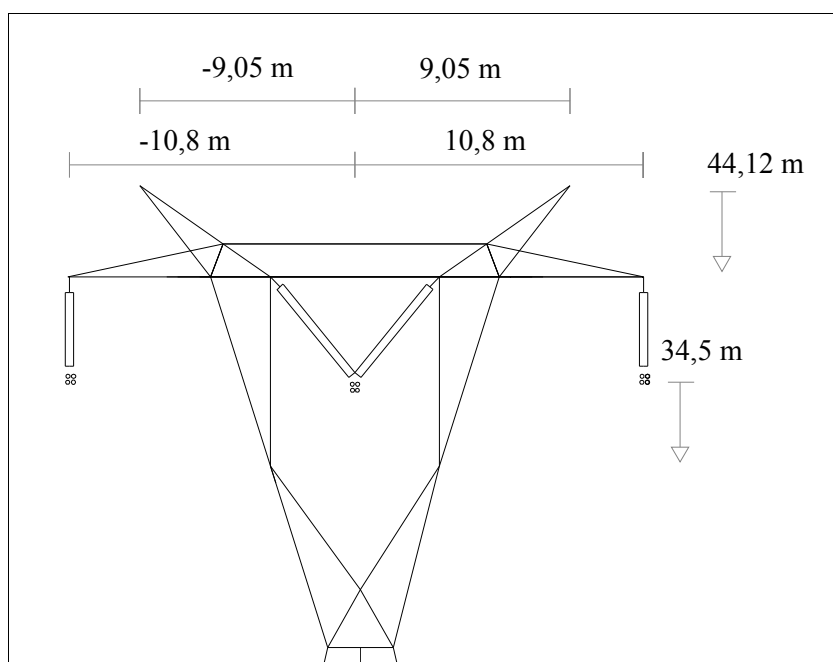


Figura 6. Representação dos cabos condutores e pára-raios na Torre.

As flechas, que representam a distância, no meio do vão, dos cabos ao solo, são de 24,4 m para as fases e 22 m para os pára-raios.

Os valores de corrente de curto-circuito, no barramento das subestações são de 40kA para o pátio de 525kV das Subestações Campos Novos e Blumenau. Este nível de curto-circuito será adotado, também para a Subestação Biguaçu.

3.3.2. Divisão da LT em seções

Para a padronização da linha, é necessário reunir segmentos da linha que apresentam as mesmas características e formar um circuito equivalente de cada seção, de tal forma que o acoplamento entre os cabos condutores e pára-raios da linha seja

uniforme. A linha de transmissão é, então, representada por uma cadeia de circuitos π equivalentes de cada segmento linha, dispostos em série, representando os todos os cabos de fase e a rede de aterramento. O comprimento de cada seção é função do comprimento do vão da linha. Neste trabalho foi adotado 490 metros como vão médio da linha, o mesmo utilizado pela ELETROSUL [51].

As fontes de excitação trifásica, que mantêm o sistema na mesma tensão de operação do sistema real, são representadas por fontes de tensão senoidal na frequência fundamental, em série com as impedâncias equivalentes vistas de cada subestação terminal. As indutâncias em cada subestação representam os equivalentes de rede vistos de cada subestação em sequência positiva e zero.

Os valores de interesse são valores RMS e as fontes podem ser convenientemente ajustadas para a sua obtenção.

Todos os cálculos foram realizados considerando transposição de fases, o que significa que os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, ferragens e solo serão compensados. O resultado esperado da transposição, segundo Stevenson [50] será a mesma indutância média para cada condutor. Na prática as linhas de transmissão raramente seção transpostas em intervalos regulares, sendo a transposição executada onde for fisicamente conveniente.

3.3.3. Caracterização do Problema

A ocorrência de faltas monofásicas para terra, que pode acontecer em qualquer local ao longo da linha de transmissão, faz com que o retorno da corrente de falta seja parte pela terra e parte pelos cabos pára-raios. Quanto mais próximo da subestação, maior é a corrente de curto-circuito, alimentada pelas duas subestações adjacentes. Uma vez que o caminho pela terra passa pelo sistema de aterramento da estrutura onde ocorreu o curto-circuito, a resistência de aterramento é um componente a ser representado na modelagem do circuito. A parte da corrente que retorna pelos cabos pára-raios depende das suas impedâncias, e, portanto, do local onde ocorreu a falta e das características de cada um dos cabos. A resistência de aterramento adotada nos cálculos da LT 525kV Campos Novos - Blumenau foi de 20 Ohm. No local onde é simulado o curto-circuito, o segmento da linha é representado torre a torre, a fim de facilitar a visualização do escoamento de corrente pelos cabos da linha e para a terra e para assegurar a menor margem de erro possível nos resultados [34]. Em cada local correspondente às torres das linhas de transmissão são introduzidas resistências de aterramento. A falta é representada por uma conexão de baixa impedância entre a fase e a torre no ponto de interesse.

A figura a seguir apresenta as correntes que fluem pelas resistências de aterramento das torres, em função da representação das resistências das torres adjacentes. Observa-se

uma significativa variação nas correntes nas resistências de aterramento à medida que se aumenta a quantidade de resistências incluídas na simulação, demonstrando o grau de detalhamento necessário para que as correntes sejam corretamente determinadas.

Corrente Circulando dos Pára-Raios para a Terra, na Torre de Curto-Circuito, em função da Representação das Resistências de Aterramento

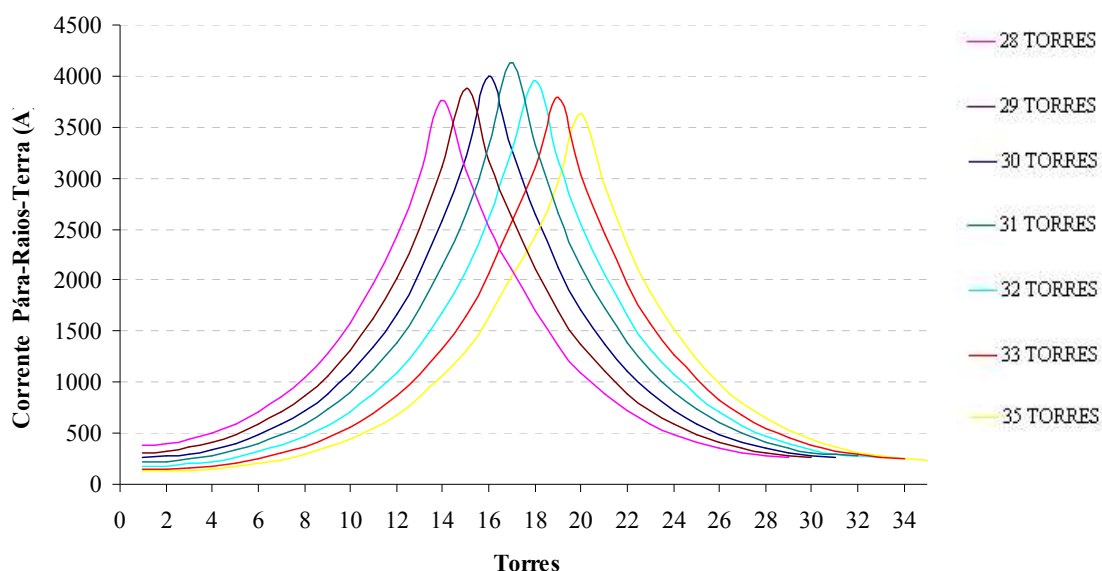


Figura 7. Circulação das Correntes de Curto-Circuito, através das Resistências de Aterramento, em Função Representação das Torres na Simulação.

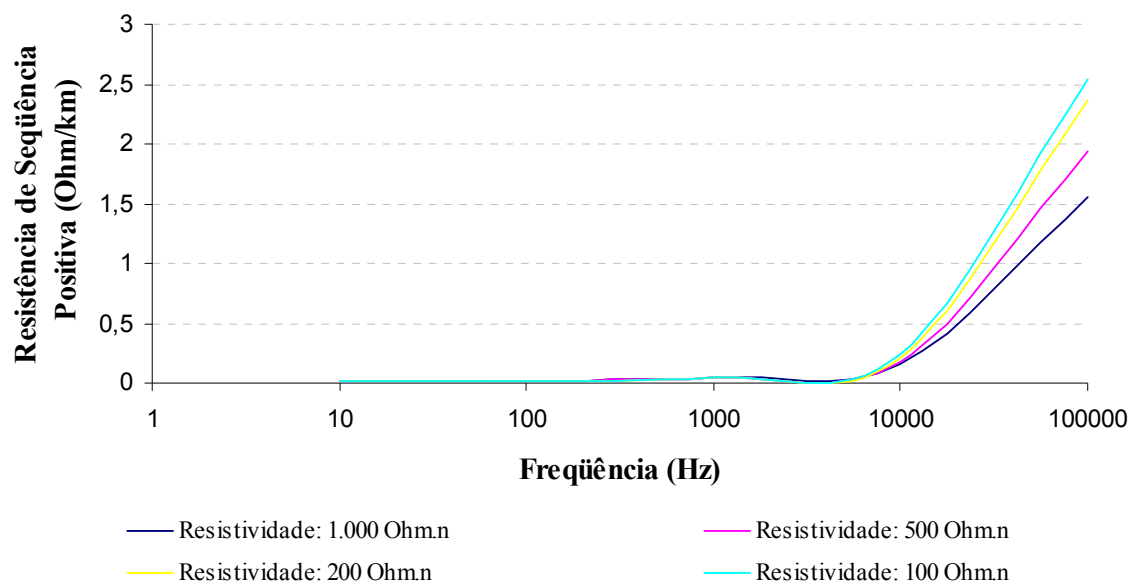
A Figura 7 ilustra a distribuição da corrente de curto ao longo das resistências de aterramento, próximas a torre onde ocorre o curto.

Lembrando que a corrente de curto-circuito pode ser dividida em duas componentes, e que uma delas (IG) difunde-se por completo pela terra num raio de 5 a 15km do ponto de falta.

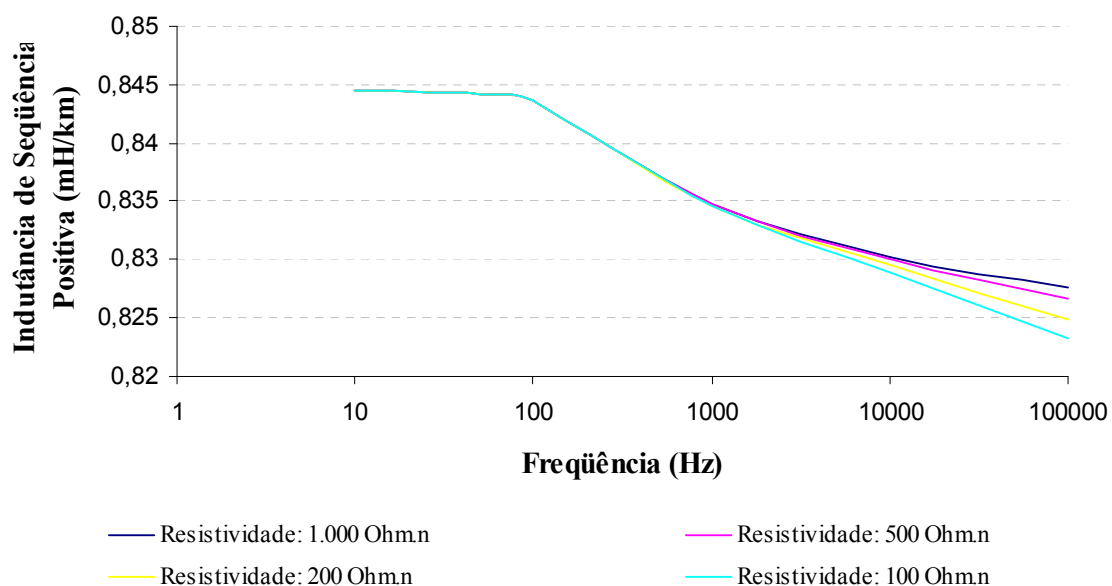
Com o objetivo de examinar como mudanças no ambiente do sistema alteram os parâmetros da linha e a distribuição das correntes de curto-circuito, foi estudada a influência da resistividade do terreno nos valores dos parâmetros de seqüência zero e seqüência positiva e os valores das correntes de curto-circuito que fluem pelo aterramento das estruturas, em função da freqüência.

Os gráficos a seguir ilustram a dependência dos parâmetros de seqüência positiva e de seqüência zero em função da freqüência e da resistividade do terreno. Observa-se que a dependência da resistência com a freqüência, para ambas as seqüências, é bastante significativa, sobretudo a de seqüência zero, entretanto esta dependência é pouco significativa abaixo de 5kHz. A dependência das indutâncias com a freqüência é evidente, mas não tão importante quanto à resistência. Observa-se que as curvas de seqüência positiva e de seqüência zero são muito diferentes, sendo a dependência mais relevante para a seqüência zero. Quanto à resistividade do solo, não há uma dependência muito significativa. A indutância de seqüência zero apresenta dependência com a resistividade do solo para freqüências a partir de 10 Hz, mas a dependência vai atenuando à medida que a freqüência aumenta.

Relação dos Parâmetros de Seqüência Positiva em Função da Frequência e da Resistividade do Terreno



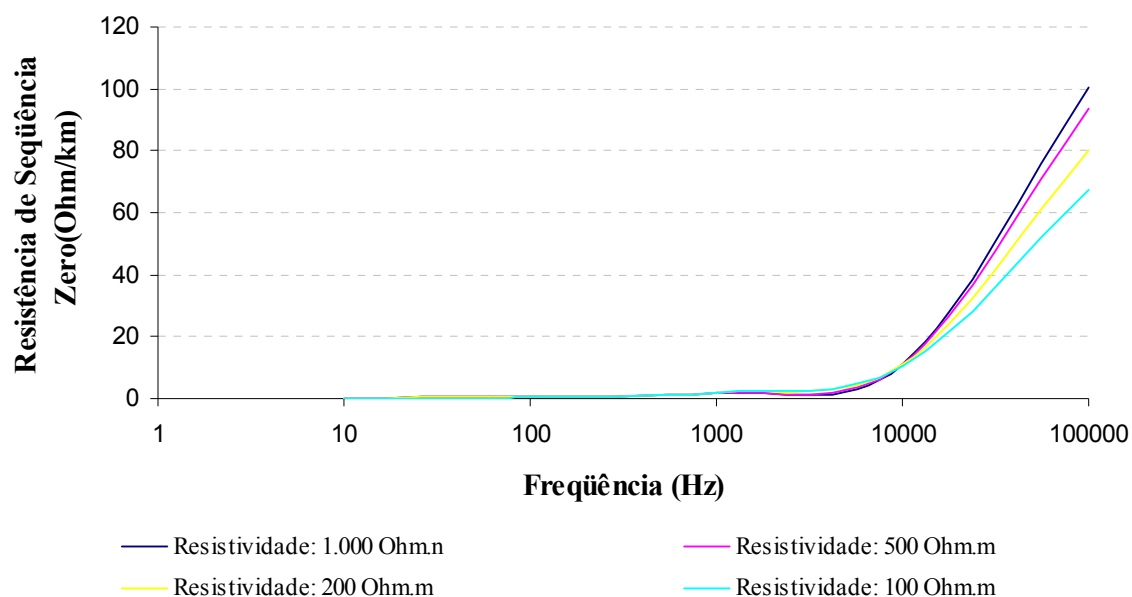
Relação dos Parâmetros de Seqüência Positiva em Função da Frequência e da Resistividade do Terreno



Gráfico

Figura 8. Relação dos Parâmetros de Seqüência Positiva da Linha e a Resistividade da Terra.

Varição dos Parâmetros de Seqüência Zero em Função da Frequência e Resistividade do Terreno



Varição dos Parâmetros de Seqüência Zero em Função da Frequência e Resistividade do Terreno

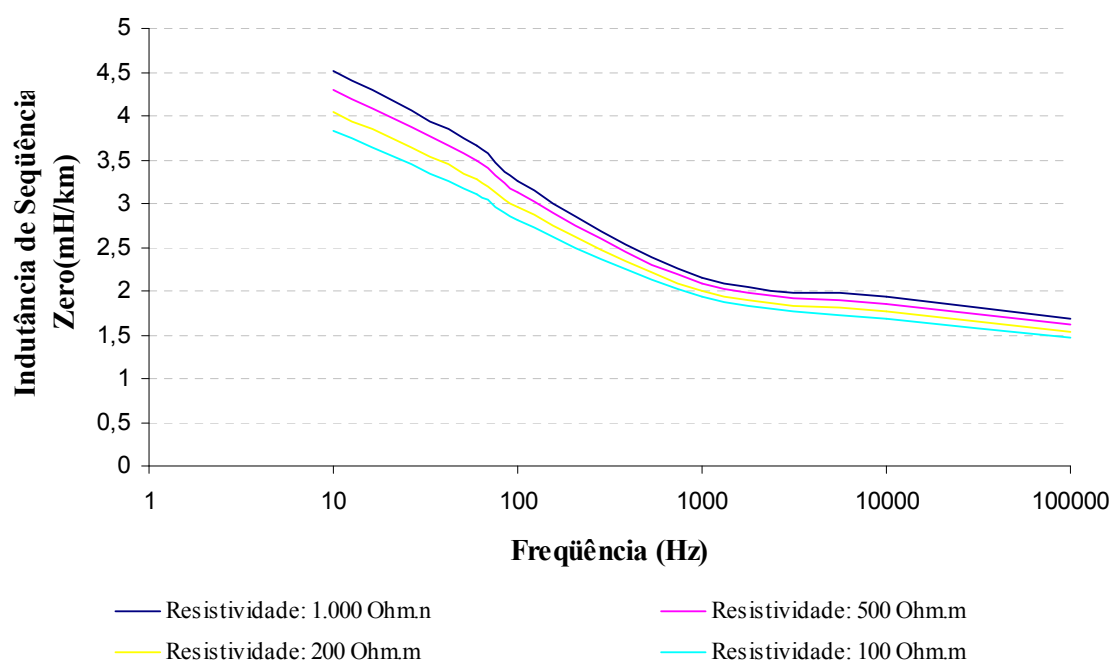


Figura 9. Relação dos Parâmetros de Seqüência Zero da Linha e a Resistividade da Terra

4. RESULTADOS

O gasoduto Brasil-Bolívia atravessa 26 municípios no estado de Santa Catarina [29] e cruza com a LT Campos Novos – Blumenau próximo ao município de Biguaçu, a 50 km da Subestação Blumenau, formando um ângulo de $60,28^\circ$ com a linha de transmissão no vão entre as torres 77-2 e 77-3.

Uma vez que as características do solo e a corrente injetada no solo durante curto-circuito podem variar de uma localização à outra da linha, é importante que o modelo adotado para simular os efeitos da interferência condutiva represente o pior caso nas proximidades do cruzamento com o duto. A resistividade média do solo, obtida a partir de medições da resistência elétrica do solo ao redor das torres próximas foi de 500 Ohm.m. Entretanto, para garantir que a interferência condutiva fosse máxima, adotou-se o valor de 500 Ohm.m nas simulações. As medições foram realizadas pela empresa Lumi Engenharia e Consultoria Ltda.

Em uma situação de curto-circuito, a porção do gasoduto dentro da área de influência da elevação de potencial de terra pode ficar submetida a potenciais elevados. Nestas condições o isolamento do gasoduto, que tem um valor finito de resistência, permitirá a circulação de corrente entre o duto e a terra por sua superfície lateral (interferência condutiva). Do ponto de vista elétrico, portanto, o duto pode ser representado por elementos de impedância longitudinal e elementos de impedância transversal

para a terra, formando um circuito de parâmetros distribuídos, tal como os condutores das torres (IESA).

Como a distância entre a tubulação e a LT varia de ponto a ponto nesta área de vizinhança, o valor da impedância mútua entre a linha e o duto também varia. Logo, é usual que o duto seja subdividido em trechos, de tal modo que a impedância mútua possa ser considerada como aproximadamente uniforme. Tudo se passa como se nesse trecho a linha de transmissão e o duto fossem ficticiamente paralelos. Desta forma, considerou-se o trecho do gasoduto, com extensão de 1,92 km [51], próximo ao cruzamento com a LT Campos Novos – Blumenau, como um condutor a mais nas torres da linha.

Nos trechos afastados do gasoduto, pode-se desprezar o acoplamento magnético da linha de transmissão com o mesmo. Considera-se apenas, o acoplamento magnético entre os condutores e os pára-raios através da impedância mútua entre eles. Nestes trechos, portanto, o duto não é inserido nas simulações e as torres são simuladas como no item 3.3. Os pára-raios são percorridos por “correntes residuais” (IR) que não causam queda de tensão nos mesmos, uma vez que a queda de tensão é contrabalançada pela tensão induzida.

O acoplamento magnético entre o gasoduto e a linha de transmissão decai rapidamente com a separação entre eles.

Segundo informações da Gerência Regional Sul, da Transportadora Brasil-Bolívia - TBG, o gasoduto Brasil-Bolívia tem diâmetro interno de 52 cm e diâmetro externo igual a 25 cm.

Ao longo de seu percurso, o gasoduto Brasil-Bolívia encontra-se ora enterrado a uma profundidade de até 1m, ora na superfície do solo. No vão de cruzamento com a linha, o duto foi considerado na linha do solo.

4.1. Interferência sob Condições Normais de Carga

A magnitude do potencial induzido no duto é ilustrada na tabela a seguir.

Ângulo de Cruzamento (°)	Corrente Máxima (A)	Tensão Máxima (V)
15	12,71055	937,7388
30	10,89878	789,8581
45	9,523982	678,6788
60	8,107939	564,0138
75	6,208655	409,6009

Tabela 1. Tensão e Corrente Induzida no Duto na Ocasão de Curto-Circuito na Torre Mais Próxima ao Cruzamento

O valor máximo de tensão pode ser observado no ponto mais próximo do cruzamento com o duto. Os resultados confirmam que o nível indutivo da interferência alcança um pico em uma descontinuidade no condutor energizado ou passivo que não é aterrado.

4.2 Interferência sob Condições de Falta

A falta considerada neste estudo, um curto-circuito entre a fase A da Linha de Transmissão e a terra, foi representada por uma conexão de baixa impedância entre a fase e a terra no ponto de interesse.

Observa-se, no Figura 10, que a corrente induzida no duto, sofre decaimento hiperbólico, e se tornará desprezível após a constante de espaço do circuito correspondente, o que representa uma extensão de $3 \times 0,64 = 1,92$ km. Por este motivo, o duto foi inserido como um condutor, apenas nas torres próximas ao cruzamento.

Depois de verificada a quantidade de seções apropriada para assegurar o acoplamento magnético com a linha, o duto foi inserido como mais um condutor nas torres, dividido em pequenas seções paralelas com a linha.

A fim de verificar a influência que o ângulo de cruzamento exerce nos valores de tensão e corrente induzida no duto, foram realizadas 5 simulações variando o ângulo de cruzamento em 15 graus. O resultado pode ser conferido na figura a seguir.

Corrente Induzida no Duto

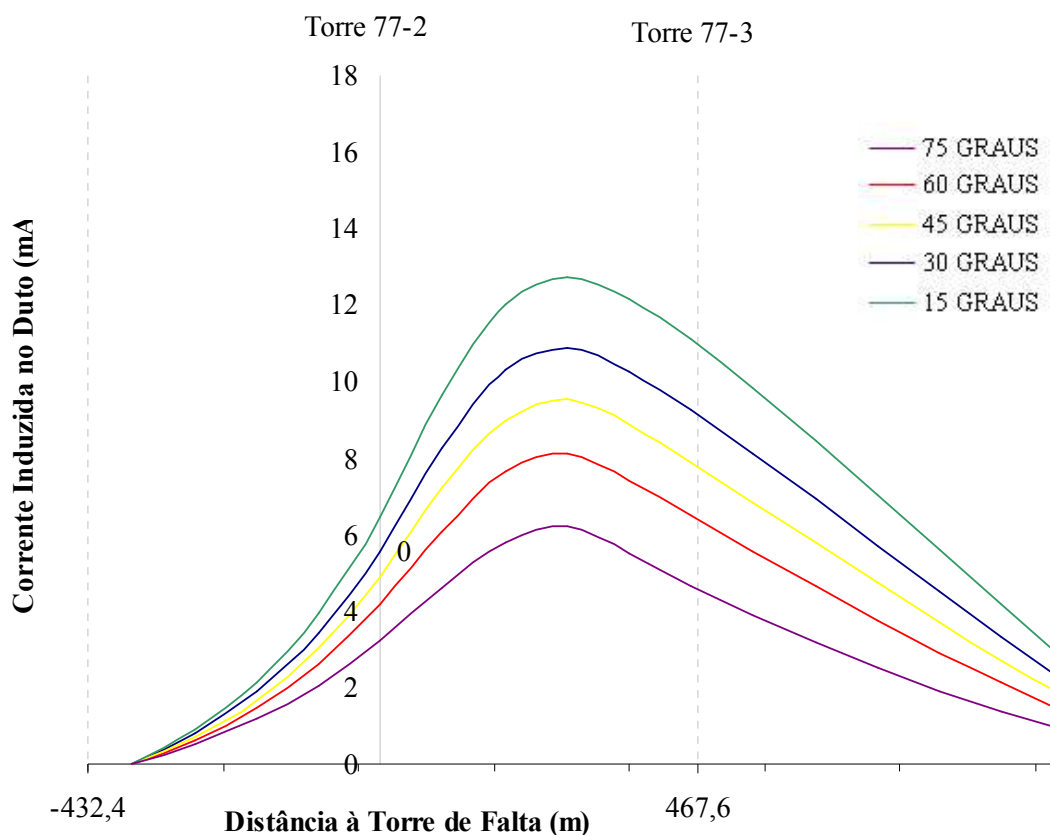


Figura 10. Distribuição da Corrente Induzida no Duto nas Vizinhanças da Torre de Falta.

A primeira condição avaliada foi um cruzamento com ângulo de 15 graus do duto com a linha. Nesta condição observou-se a maior interferência eletromagnética, uma vez que a tensão induzida no duto, devido ao curto-circuito na torre 77-2 foi 43,67% maior que a tensão induzida no caso de ângulo igual a 75 graus de cruzamento. Este resultado pode ser explicado pela equação (2.1.11) que ilustra como uma variação de fluxo magnético cria uma força eletromotriz. Considerando a parcela de

interferência indutiva e corrente senoidal, a equação passa a ser da seguinte forma:

$$V(t) = +j\omega (L_M) I \cos(\omega t) \quad (4.1)$$

Onde L_M é a indutância mútua entre os dois circuitos e reflete a relação entre a força eletromotriz induzida no duto, gerada pela corrente no emissor da interferência, e depende da sua geometria e das correntes que circulam por eles [49].

A indutância mútua de acoplamento neste caso é máxima, uma vez que a indução magnética \mathbf{B} é máxima e, portanto, a força eletromotriz resultante da variação do fluxo do campo magnético também é máxima.

O mecanismo de acoplamento condutivo requer a formação de um circuito fechado entre o emissor e o receptor da interferência.

Neste caso, a tensão induzida devido ao acoplamento condutivo é:

$$V(t) = (Z_M) I \sin(\omega t) \quad (4.2)$$

Onde Z_M é impedância transversal mútua entre o emissor da interferência e o duto e reflete a relação entre a elevação do potencial médio no duto, devido à densidade de corrente no emissor.

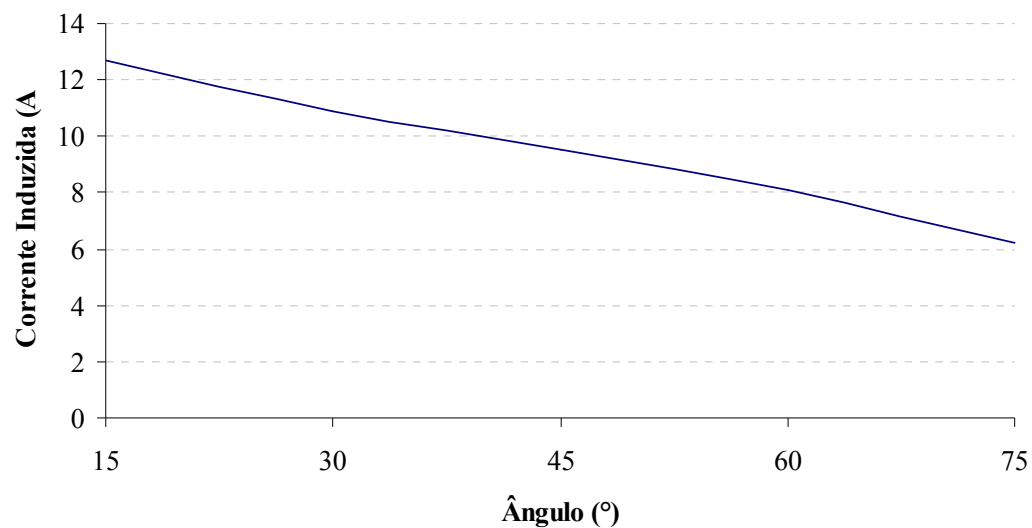
Estas considerações podem ser feitas porque estamos considerando o duto como um condutor finito, cujo comprimento é determinado pelas seções paralelas com a linha.

No caso do cruzamento formando um ângulo de 75° com a linha, a tensão induzida no duto foi de 409,6 Volts, uma vez que apenas a interferência condutiva está atuando.

A parcela de tensão induzida, devido à interferência condutiva, deve-se ao campo elétrico resultante da corrente de curto-circuito através das resistências de aterramento das estruturas próximas ao cruzamento. O campo elétrico é proporcional à tensão induzida no duto, que por sua vez diminui à medida que a distância entre o duto e a linha aumenta.

A Figura 11 a seguir ilustra a variação da tensão e da corrente induzida no duto, na ocorrência de curto-circuito fase-terra na torre mais próxima ao cruzamento com a LT. Na condição de menor ângulo, a tensão induzida no duto é máxima, pode-se observar a variação da tensão induzida ao longo do cruzamento aumenta à medida que o ângulo de cruzamento diminui.

Corrente Máxima Induzida no Duto em função do Ângulo de Cruzamento com a LT



Tensão Máxima Induzida no Duto em Função do Ângulo de Cruzamento com a LT

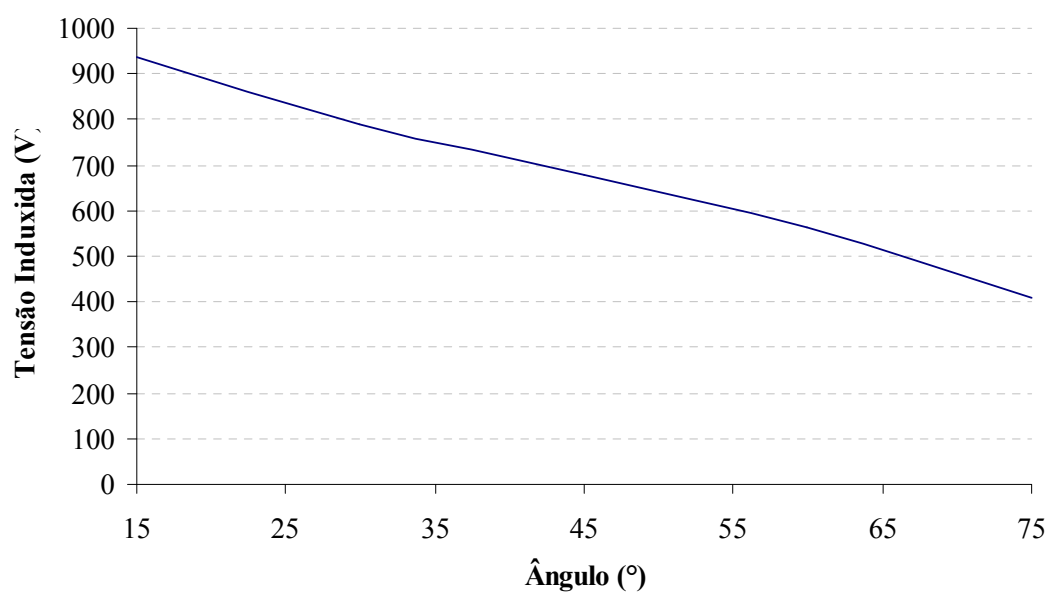


Figura 11. Variação de Corrente e Tensão Induzida no Duto em Função do Ângulo de Cruzamento com a Linha de Transmissão

5. CONCLUSÃO

Este trabalho ilustrou as grandezas e os fenômenos eletromagnéticos importantes no acoplamento entre linhas de transmissão e dutos.

Verificou-se, a partir das equações de Maxwell, que o modelo matemático adequado para representar as linhas de transmissão deve ser baseado em equações diferenciais, portanto as linhas de transmissão devem ser modeladas por parâmetros distribuídos.

Em uma explanação sobre o desenvolvimento do sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil observou-se que o crescimento das linhas de transmissão no Brasil ocorreu de forma acelerada. Atualmente estão em operação 83.947,216 km de linhas no Sistema Interligado Nacional (SIN) [52], compreendendo tensões da ordem de 230kV a 750kV. Quanto à distribuição de gás, a rede brasileira de gasodutos conta com mais de 4.000 quilômetros, dos quais 3.460 foram concluídos nos últimos vinte anos. Além disso, o aumento da integração energética entre os países da América do Sul permite ao Brasil acessar as reservas de gás venezuelano, boliviano e argentino. Esta panorâmica da situação atual da rede de distribuição de gás e energia elétrica ilustra a importância de conhecer uma ferramenta computacional que calcule a interferência eletromagnética entre dutos e linhas de transmissão de forma

rápida e precisa, uma vez que, a perspectiva para o futuro é de que cada vez mais elas dividirão o mesmo corredor.

Uma abordagem padronizada estabelece uma linguagem comum entre diferentes tipos de usuários, estimulando o intercâmbio de conhecimento, aumentando a produtividade e otimizando a execução de tarefas, portanto estabelecer uma padronização para modelar linhas de transmissão e dutos no ATP foi um dos objetivos deste trabalho. Uma metodologia para inserir os dados da linha de transmissão, do duto, das características do meio e do curto-circuito foi estabelecida para assegurar que o acoplamento indutivo e condutivo fosse levado em consideração nas simulações computacionais. Além disso, este trabalho fez uma revisão da metodologia utilizada pelo programa computacional ATP para realizar os cálculos.

A análise teórica das características de um curto-circuito em uma linha de transmissão ajudou a esclarecer o fenômeno de interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos, uma vez que o tipo de interferência é consequência do escoamento destas correntes.

O trabalho demonstrou ainda, quais os fatores que interferem diretamente nos parâmetros da linha e que irão interferir na corrente de falta, alterando, portanto a interferência entre o duto e a LT. Observou-se que para frequências abaixo de 100kHz, com exceção da resistência de sequência positiva que apresenta dependência com a frequência e com a resistividade do terreno para valores da ordem de 10kHz, não há alteração dos parâmetros

de seqüência positiva e nem dependência com a resistividade do solo. A indutância de seqüência positiva, entretanto, varia com a freqüência para valores a partir de 100kHz, mas a dependência com a resistividade só ocorre para valores acima de 100kHz.

No que diz respeito à tensão induzida no duto, devido à interferência eletromagnética com a linha de transmissão, demonstrou-se que ela é inversamente proporcional à distância entre a LT e a tubulação. No caso de cruzamento, objeto de estudo deste trabalho, observou-se que para ângulo reto de cruzamento a tensão induzida no duto é mínima. À medida que o ângulo diminui a tensão induzida aumenta de tal forma que para ângulo de 15° a tensão induzida é 43,6% maior que aquela com ângulo de 75° . Observou-se que este comportamento é devido aos diferentes tipos de acoplamento eletromagnético entre a linha e a tubulação. O acoplamento indutivo está associado aos campos magnéticos resultantes das correntes que circulam na linha e é máximo em situação de curto-circuito, pois correntes passam a circular também pelos pára-raios da linha. O acoplamento condutivo apresenta valor relevante em situação de curto-circuito quando correntes passam a escoar para a terra através das resistências de aterramento das torres [30].

Os resultados das simulações computacionais foram fundamentais para que a Linha de Transmissão em 525kV Campo Novos – Blumenau fosse implementada, uma vez que foi possível verificar que as tensões induzidas no duto, em diferentes situações de operação da linha, não representariam perigo para a tubulação

nem comprometeriam a segurança de pessoas que eventualmente pudessem ter contato com mesma, atendendo às normas de segurança da ANEEL [52]. Além disso, a padronização elaborada neste estudo facilitou e aperfeiçoou o processo de cálculo de interferência, uma vez que o usuário já tinha uma metodologia pré-estabelecida para inserir os dados da linha de transmissão e do duto no programa ATP.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. DAWALIBI, F. P.; SOUTHEY, R.; MA, J. et. Al. On The Mechanisms of Electromagnetic Interference Between Electrical Power Systems and Neighboring Pipelines. Safe Engeneering Services & Technologies ltd. Canadá. p. 1 - 7
- [2]. BARRETO, R. M. Influência de Linhas de Transmissão/Distribuição em Sistemas Eletrônicos, de Telecomunicações e de Automação. QUEMC, Rio de Janeiro.
- [3]. FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. ATP Alternative Transients Program - Curso Básico Sobre a Utilização do ATP. CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Novembro 1996
- [4]. http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations
- [5]. LODER, L. L; Teoria Eletromagnética Aplicada A. 1997.
- [6]. RESNICK, J; HALLIDAY R.; WALKER D. Fundamentos da Física 3 – Eletromagnetismo. ed. LTC,
- [7]. BASTOS, J. P. A. Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática. 1. ed. UFSC, 2004

- [8]. CHATTERTON, P. A., HOULDEN, M. A. EMC Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons, 1992.

- [9]. ISOLA, V.; MARTINS, R. A. A História do Eletromagnetismo, na internet: http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/lista_projetosF809.htm

- [10]. GÓMEZ, A. N. Espalhamento Eletromagnético: Análise Via Método de Elementos Finitos Acoplado ao Método de Correntes Multi-Filamentares. Belo Horizonte, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais.

- [11]. DUARTE, N. F.; ROSA, C. K.; SCHROEDER, M. O.; et al. Efeito do Solo na Propagação de Distúrbios Eletromagnéticos em Linhas Aéreas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (1.: Setembro, 2005: Belo Horizonte, Minas Gerais). Anais. Minas Gerais, 2005.

- [12]. MARTINEZ, J. A.; MAHSEREDJIAN, J.; WALLING, R. A. Parameter Determination - Procedures for Modeling System Transients. IEEE Power & Energy Magazine, v. 3, n. 5, p.16-27. Setembro/Outubro 2005.

- [13]. CAMARGO, C. C. B. Transmissão de Energia Elétrica. ed. UFSC/ELETROBRAS, 1984.
- [14]. FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas I. v. 1, ed. Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [15]. FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas II. v. 21, ed. Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [16]. www.mme.gov.br
- [17]. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006 - 2015. Brasília, 2006.
- [18]. www.eletrosul.gov.br
- [19]. SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 3 ed. Bookman Editora, 2004. cap 10.
- [20]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Referências Bibliográficas. NBR 7270, NBR 7271. Maio 1988.
- [21]. PEREIRA, C. E. M., ZANETTA, L. C. Metodologia Para Dimensionamento de Cabos-Guarda em Linhas de Transmissão de Alta Tensão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

- DE SISTEMAS ELÉTRICOS (Junho 2006: Campina Grande, Paraíba). Anais, Paraíba, 2006, p. 1-5.
- [22]. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.; 2006. IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. 1. ed. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006.
- [23]. RODRIGUES, Bruno. Gasoduto Virtual - Uma Alternativa Para Expansão do Uso do Gás Natural. São José do Rio Preto, 2004. Dissertação (Bacharelado em Administração de Empresas) – Universidade Paulista.
- [24]. PETROBRAS. Área de Negócios Internacional. Plano de Negócio 2006-2010, 2005.
- [25]. CECCHI, José Cesário. Indústria Brasileira de Gás Natural:Regulação Atual e Desafios Futuros. Agência Nacional do Petróleo, 2001.
- [26]. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2005 – Ano Base 2004, Rio de Janeiro, 2005.
- [27]. LAUREANO, Fernanda Helena Garcia Cobas. A Indústria de Gás Natural no Brasil e a Viabilização de Seu Desenvolvimento. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação

- (Bacharelado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [28]. VILAS BOAS, Marina Vieira. Integração Gasífera no Cone Sul: Uma Análise das Motivações dos Diferentes Agentes Envolvidos. Rio de Janeiro, 2004. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [29]. <http://www.tbq.com.br/site/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=71>
- [30]. Guide Concerning Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines.
- [31]. SOUTHEY, R.D.; DAWALIBI, F.P.; VUKONICH, W. Recent Advances in the Mitigation of AC Voltages Occurring in Pipelines Located Close to Electric Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 2, p. 1090-1097, Abril 1994.
- [32]. DAWALIBI, F.P.; SOUTHEY, R.D. Analysis of Electrical Interference From Power Lines to Gas Pipelines. Part II: Parametric Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, p. 415-421, Janeiro 1990.
- [33]. SOBRAL, S. T.; FILHO, J. A.; AZZAM, G.; et al. Transmission Lines Crossing Several Times a Single Pipeline Modelling Techniques for a Suitable

- Representation of Inductive and Resistive Couplings. IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE & EXPOSITION: LATIN AMÉRICA. (2004), p. 69-74.
- [34]. SOBRAL, S. T., FLEURY, V. P., VILLALBA, J. R., et al. “Decoupled Method” for Studying Large Interconnected Grounding Systems Using Microcomputers – Part I – Fundamentals. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 4, p. 1536-1544, Outubro 1988.
- [35]. SOBRAL, S. T., FLEURY, V. P., VILLALBA, J. R., et al. “Decoupled Method” for Studying Large Interconnected Grounding Systems Using Microcomputers – Part II – Utilization on Itaipu Ground System and Complementary Aspects. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 4, p. 1545-1552, Outubro 1988.
- [36]. FERNANDES, A. B.; LIMA, A.C.S.; NEVES, W.L.A.; et al. Aplicação de modelos de Linhas de Transmissão em Estudos Sobre Qualidade da Energia Elétrica. In:SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (6.: Agosto 2005: Pará). Anais. Pará, 2005. p.605-612.
- [37]. GOLE, A.M.; KERI, A.; NWANKPA C.; et al. Guidelines for Modeling Power Electronics in Electric

- Power Engineering Applications. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n.1, p 505-514, Janeiro 1997.
- [38]. PEREIRA, M. P. Introdução ao ATP, Furnas Centrais Elétricas S.A. Departamento de Planejamento e Transmissão, Rio de Janeiro.
- [39]. MEISTER, Andre. Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento. Brasília, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- [40]. TAVARES, M.C.; CAMPOS, P.G.; PRADO, P. Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program. Campinas, 2003. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas.
- [41]. MARTI, J. R., LIN, J. Suppression of Numerical Oscillations in the EMTP. IEEE Transactions on Power Systems, v. 4, n. 2, p. 739-747, Maio 1989.
- [42]. DOMMEL, H. W. Techniques for Analyzing Electromagnetic Transients. IEEE Computer Applications in Power, v. 10, n. 3, p. 18-21, Julho 1997.
- [43]. HAFFNER, S. L.; DIAS, A. D.; BOETTNER, D. M. Cálculo de Sobretensões em Sistemas de Distribuição. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE POTENCIA IEEE

- CHILE (6.: Agosto 1994: Santiago, Chile). Anais. Chile, 1994. p. 226-230.
- [44]. FERNANDES, A. B.; LIMA, A. C.; NEVES, W.L. Desempenho de Modelos Computacionais de Linhas de Transmissão no Cálculo de Tensões Induzidas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (15.: Setembro 2004:Gramado, Rio Grande do Sul).Anais. Rio Grande do Sul, 2004.
- [45]. DOMMEL, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual, Vancouver, 1996.
- [46]. <http://www.okime.com.br/>
- [47]. CIGRE Working Group 02. Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients. CIGRE Brochures 39, 1990.
- [48]. LEUVEN EMTP CENTER (LEC). Alternative Transient Program Rule Book, 1987.
- [49]. SCHROEDER, Marco Aurélio de Oliveira. Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo. Belo Horizonte, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.

- [50]. STEVENSON, W. D., Elements of Power System Analysis. Ed. Mc Graw-Hill, 1986.
- [51]. Análise de Interferências Elétricas no Gasoduto TBG Brasil-Bolívia (Vão 77-2/77-3). SC ENERGIA, 2006.
- [52]. www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/boletim255.htm
- [53]. www.mme.gov.br
- [54]. FELLOW, J. A.; SHORT, T.A. Algorithms for Calculation of Lightning Induced Voltages on Distriubution Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 8, n. 3, p. 1217-1225, Julho 93.
- [55]. COORAY, V. Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: a Comparison of two Coupling Models. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 36, n. 3, p. 179-182, Agosto 1994.
- [56]. PAOLONE, M.; PETRACHE, E.; RACHIDI, F. et al. Lightning Induced Disturbances in Buried Cables-Part II: Experiment and Model Validation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 47, n. 3, p. 509-520, Agosto 2005.
- [57]. IACCARINO, F. A. Situação de Abastecimento do Gás Natural. In: SEMINÁRIO MATRIZ ENERGÉTICA X

CUSTOS E BENEFÍCIOS DO USUÁRIO (Julho 2006: São Paulo) *Anais*, São Paulo 2006.

- [58]. SANT'ANNA, Cezar José. Estudo do Desempenho de Sistemas de Aterramento Frente às Descargas Atmosféricas em Instalações de Baixa e Média Tensão. Bauru, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.
- [59]. NUCCI, C. A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M. V. et al. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 35, n. 1, p. 75-86, Fevereiro 1993.
- [60]. HØIDALEN, H. C. Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines Above Lossy Ground. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 45, n. 1, p. 92-100, Fevereiro 2003.
- [61]. CHOWDHURI, P. Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 568-667, Abril 1990.
- [62]. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced Voltages on Distribution Lines due to Lightning Discharges on Nearby Metallic Structures. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 34, n. 5, p. 2799-2802, Setembro 1998.

- [63]. AGOSTINI, M. N.; SOUZA, A.; SILVA, A. S. et al. Simulação Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando o PSPICE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (14.: Setembro 2002: Rio Grande do Norte) . *Anais*. Rio Grande do Norte, 2002. p. 1200-1205.
- [64]. NETO, Acácio Silva. Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Automação Elétrica) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- [65]. BATISTA, D. A. R. Análise do Desempenho de Algoritmos para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão. Pará, 2006. (Relatório Técnico-Científico do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica)- Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará.
- [66]. DOMMEL, H. W., MEYER, W. S. Computation of Electromagnetic Transients. *Proceedings Of The IEEE*, v. 62, n.7, p. 983-993, Julho 1974.
- [67]. GALVAN, A., COORAY, V. Analysis of Lightning-Induced Voltages in a Network of Conductors Using the ATP-EMTP Program. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (10.: Setembro

- 1997: Coventry, United Kingdom). *Anais*. United Kingdom, p. 153-157.
- [68]. CUNHA, Luiz Fernando Jorge. Mapeamento da Pluma de Contaminação em Depósitos de Resíduos da Indústria de Couro, Através de Métodos Geofísicos- Dois Casos em Mato Grosso. Cuiabá, 2005. Dissertação (Mestrado em Física e Meio-Ambiente) Universidade Federal do Mato Grosso.
- [69]. CUI, Y., DOMMEL, H. W., XU, W. A Comparative Study of Two Synchronous Machine Modeling Techniques for EMTP Simulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 19, n. 2, p. 462-463, Junho 2004.
- [70]. GATOUS, Omar Mohamed Omar. Simulação Numérica de Linhas de Transmissão Considerando o Efeito Pelicular. Campinas, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.
- [71]. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; 2004. Linha de Transmissão 525 kV Campos-Novos – Blumenau – C2 Características e Requisitos Técnicos Básicos das Instalações de Transmissão. Edital de Leilão N°001/2004-ANEEL, Brasília, 2004. p. 715-781.
- [72]. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; 2004. *Edital do Leilão N°001/2004-ANEEL*. Brasília, 2004.

- [73]. GERTRUDES, João Bosco. Tratamento de Dados de Campo e Influência no Desempenho de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. Campinas, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- [74]. SOBRAL, S. T.; CASTINHEIRAS, W.; COSTA, V. S. et al. Interferences Between Faulted Power Circuits and Communication Circuits or Pipelines - Simplification Using the Decoupled Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 4, p. 1599-1606, Outubro, 1991.
- [75]. ZÜRN, H. H., SILVEIRA, F. S., AGOSTINI, M. N. *Normas para Apresentação de Dissertações e Teses*. Florianópolis, 1999. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [76]. THIDÉ, Bo. *Electromagnetic Field Theory*. Local:Upsilon Books, 2004.
- [77]. <http://www.sestech.com/Services/TechnicalPublication/s.htm>
- [78]. ANEEL, Boletim Energia, Informativo Semanal, N 255, 1 a 7 de fevereiro 2007.